

Université de Paris Sorbonne (Paris IV)
U.F.R. de Musique et Musicologie

Mémoire de Maîtrise

Présenté par :
Aline HUFSCMITT

**LA SYNTHÈSE PAR MODELES
PHYSIQUES**

Directeur de Recherche : Marc BATTIER

Juin 2000

Aline HUFSCMITT

**LA SYNTHÈSE PAR MODELES
PHYSIQUES**

Université de Paris Sorbonne (Paris IV)
U.F.R. de Musique et Musicologie

Mémoire de Maîtrise

Présenté par :
Aline HUFSCMITT

**LA SYNTHÈSE PAR MODELES
PHYSIQUES**

Directeur de Recherche : Marc BATTIER

Juin 2000

AVANT-PROPOS

La synthèse sonore par modèles physiques est une nouvelle technique de synthèse sonore qui fait l'objet de recherches et développements depuis maintenant une vingtaine d'années. Cependant, elle n'est apparue au grand public qu'en 1994 avec le premier synthétiseur en faisant usage : le VL1. Nous constatons donc qu'il s'agit d'une création très récente. La synthèse par modèles physiques revêt différents aspects. Quelques travaux universitaires s'attachent à l'étude d'un des aspects particuliers de cette technique mais aucun d'eux ne s'est encore attaché à une étude générale de cette synthèse. Il eut été dommage que cette technique continue à être méconnue des musiciens car elle diffère totalement des autres méthodes de synthèse et son apport pourrait être considérable. L'intérêt que je porte personnellement à la synthèse numérique du son, ainsi que la nouveauté, l'originalité et la méconnaissance de cette technique, m'ont donné le désir d'en faire un exposé clair et critique.

En dehors des quelques musiciens et compositeurs privilégiés qui ont eu l'occasion d'utiliser une des formes existantes de synthèse par modèles physiques, la majorité des musiciens ignorent totalement de quoi il s'agit, et les privilégiés eux-mêmes ignorent parfois en quoi consistent les autres techniques qu'ils n'ont pas utilisées. J'ai donc pris le parti de décrire longuement et dans le détail les diverses méthodes de synthèse par modèles physiques, avant d'établir une critique générale de cette technique de synthèse, illustrées par des exemples sonores proposés sur les deux disques joints.

Je remercie chaleureusement les compositeurs François Nicolas et Guillaume Loizillon qui ont accepté un entretien, ainsi que David Jaffe qui a bien voulu répondre à mes questions par courriers électroniques interposés. Je les remercie également, de même que Kaija Saariaho, de m'avoir procuré des enregistrements de leurs œuvres, parfois inédites. J'adresse aussi mes remerciements à Marc Battier qui m'a guidée tout au long de mes recherches et à mon frère Marc Hufschmitt qui m'a particulièrement soutenu dans mon travail.

AVERTISSEMENTS

En raison de la nouveauté de cette technique, de la faible connaissance que le public a des résultats sonores qu'elle permet d'obtenir, mais également en raison du fait que les œuvres proposées en exemple ne sont pas publiées, j'ai fait le choix de proposer des œuvres intégrales en dépit la longueur que cela peut entraîner.

Je signale au lecteur que j'ai omis volontairement de détailler les techniques de synthèse vocale par modèles physiques, au profit des techniques de modélisation des instruments ; parmi elles, le logiciel CHANT dont la première version date de 1978, réalisé à l'IRCAM par Bennet et Xavier Rodet, en collaboration avec l'acousticien Johan Sundberg, et le logiciel SPASM de Perry Cook, développé au CCRMA de Stanford.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	5
INTRODUCTION	9
I. PRÉSENTATION ET HISTORIQUE DES MODELES PHYSIQUES EN MUSIQUE	11
1. <i>Description générale</i>	11
2. <i>Historique</i>	15
3. <i>Etat de l'art</i>	19
II. LES GRANDES TECHNIQUES DE MODÉLISATION	21
1. <i>Les démarches scientifiques et artistiques de modélisation</i>	21
2. <i>Approche classique de la synthèse par modèles physiques : Les travaux de Hiller et Ruiz</i>	25
3. <i>La synthèse modale</i>	31
4. <i>La synthèse par guides d'ondes</i>	61
5. <i>Les applications industrielles</i>	78
III. LA CRÉATION ARTISTIQUE AUTOUR DES MODÈLES PHYSIQUES	102
1. <i>Modèle de signal et modèle physique</i>	102
2. <i>La légitimité de la synthèse par modèles physiques</i>	106
3. <i>Objet sonore / Événement sonore</i>	112
4. <i>Un savoir instinctif ?</i>	114
5. <i>Analyse des sons pour extraire des modèles de synthèse physique</i>	116
6. <i>Savoir imiter pour mieux corrompre</i>	118
7. <i>Le contrôle du modèle simulé</i>	128
8. <i>Espace, rayonnement et diffusion des sons synthétisés</i>	136
9. <i>Laisser l'œuvre disparaître ou provoquer son obsolescence</i>	141
CONCLUSION	144
ANNEXE 1 : ENTRETIENS AVEC LES COMPOSITEURS	148
1. <i>Entretien avec François Nicolas</i>	148
2. <i>Entretien avec Guillaume Loizillon</i>	158
3. <i>Courriers de David Jaffe</i>	166
ANNEXE 2 : EXEMPLES MUSICAUX	172
1. <i>Pipe and Drum de Ercolono Ferreti, 1963</i>	174
2. <i>Sons réalisés avec Modalys</i>	175
3. <i>Amers de Kaija Saariaho, 1992</i>	176
4. <i>Dans la distance de François Nicolas, 1994</i>	177
5. <i>Guillaume Loizillon</i>	178
6. <i>Sons provenant du synthétiseur VLI de Yamaha</i>	179
7. <i>Sons du synthétiseur VG8 de Roland</i>	180
8. <i>David Jaffe</i>	181
BIBLIOGRAPHIE COMMENTÉE	188
DOCUMENTS ELECTRONIQUES	198
DISCOGRAPHIE	204
INDEX	206

INTRODUCTION

La synthèse par modèles physiques est une nouvelle méthode de synthèse sonore réalisée par ordinateur. Nous nous attacherons dans ce mémoire à décrire tous les aspects de cette technique avant d'en faire la critique.

Comme le fait remarquer Claude Cadoz¹, le langage a tendance à produire des expressions contradictoires ou vides de sens quand il est utilisé trop vite à des fins de justification ou de rentabilité immédiates. Malheureusement, l'expression « modèles physiques » n'échappe pas à la règle. Le terme « modèle » désigne quelquefois l'ensemble des algorithmes dirigeant l'ordinateur ; d'autres fois, la modélisation d'un phénomène est confondue avec celle de ce qui l'engendre. Le mot « physique », quant à lui, n'apporte aucune information car la création d'un son par synthèse additive d'après une décomposition de Fourier est également la modélisation d'un phénomène physique. « Est-ce en fait ce que l'on modélise qui est physique ou est-ce la manière de le modéliser ? Est-ce le modèle qui est physique ou la physique qui est modèle ?¹ ». Pour préciser le sens de cette expression des plus floues, considérons une fois pour toutes que le « modèle » est le programme qui définit un objet susceptible de vibrer et que ce « modèle » est « physique » dans le sens où il décrit physiquement l'objet, les matériaux qui le composent (bois de telle densité, de telle élasticité...) et les lois qui régissent le monde dans lequel il va rentrer en vibration (pesanteur, température, pression atmosphérique...).

Après une brève présentation de cette technique et de son histoire, nous décrirons de manière détaillée les différentes techniques de synthèse par modèles physiques et leurs applications commerciales. Ensuite nous procéderons à une critique générale de cette méthode de synthèse, illustrée par différents extraits musicaux issus des deux disques compacts d'exemples.

L'idée de cette synthèse par modèles physiques est apparue dès le début du XX^{ème} siècle mais les premières applications n'ont été envisageables qu'avec les progrès de l'informatique. Ce n'est que récemment qu'elle fait l'objet d'applications musicales. Les

¹ C. Cadoz, « Simuler pour connaître / Connaître pour simuler. Réflexions sur la représentation, la modélisation, la simulation et la création avec l'ordinateur » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. III, p. 688-89.

œuvres proposées sur les deux disques compacts ont, d'ailleurs, toutes été conçues dans les dix dernières années. Il s'agit donc d'une technique récente, encore méconnue et peu utilisée par les compositeurs. Notre but, dans ce mémoire, est d'instruire le lecteur, de lui faire découvrir les grandes méthodes de synthèse physique à vocation musicale. Mais, cette technique, si nouvelle soit-elle, a-t-elle vraiment quelque chose d'intéressant à apporter au monde musical ? Quels sont ses avantages, ses défauts ? En quoi est-elle si révolutionnaire ? A travers une critique objective de cette technique nous tenterons de dégager ses qualités et ses défauts afin d'en déduire son utilité réelle pour le compositeur et les progrès nécessaires. Nous allons débiter notre étude par une présentation générale de cette synthèse.

I. PRESENTATION ET HISTORIQUE DES MODELES PHYSIQUES EN MUSIQUE

1. Description générale

La *synthèse par modèles physiques*² est une technique de synthèse sonore qui, au lieu de s'attacher à reproduire le son lui-même (par l'analyse des fréquences qui le compose par exemple), part du dispositif physique producteur de ce son. Ainsi, cette technique se démarque des méthodes de synthèse digitale comme la synthèse soustractive, additive, etc. L'objectif de cette synthèse est autant scientifique qu'artistique car celle-ci permet aux scientifiques d'approfondir leur connaissance des phénomènes sonores et offre aux musiciens un nouveau matériau pour la composition.

Avant que le musicien puisse utiliser la technique de synthèse sonore par modélisation physique, c'est aux scientifiques que revient la charge de créer le modèle virtuel d'un instrument particulier ou le logiciel de modélisation qui permettra de « construire » les instruments virtuels voulus par le compositeur. La notion de modèle joue ici un rôle essentiel, comme dans toutes les disciplines consistant à simuler puis extrapoler des phénomènes naturels. Ce modèle est une abstraction qui a pour but de condenser de manière formelle l'information, représentée par un ensemble de paramètres, véhiculée par le son. La démarche du physicien consiste à traduire, à partir des lois fondamentales de la mécanique et de l'acoustique, l'ensemble des interactions observées entre les différentes parties de l'instrument, ceci en vue de modéliser la cause physique de la production sonore. Le but est de savoir dans quelle mesure le modèle mathématique peut représenter efficacement les mécanismes de production du son des instruments acoustiques. Ce modèle ne peut être qu'une version simplifiée du système réel, ne prenant en compte, sous forme mathématique, que les phénomènes mécaniques jugés pertinents. La production de sons

² Il arrive que la technique soit appelée « synthèse par règles » (Ferreti 1965) ou « synthèse d'après les principes élémentaires » (Weinreich 1983), mais actuellement le terme de « synthèse par modèle physique » est le plus usité.

par le modèle est simulée et étudiée numériquement : l'écoute détermine si les sons obtenus ont bien les caractéristiques de ceux produits par l'instrument réel. Cette étape d'expérimentation permet de qualifier l'influence des différents paramètres mesurables sur des caractéristiques qui restent subjectives comme les modes de jeu (multiphoniques, chaotiques, non-oscillants...) ou les critères perceptifs (brillance du son, rugosité,...). Le dialogue du scientifique avec l'instrumentiste est ici primordial.

Cette étape d'imitation est indispensable pour obtenir la compréhension la plus parfaite possible des sons déjà existants. L'élaboration de sons inouïs est entièrement fondée sur la possibilité de simuler des instruments réels. Ceci peut paraître restrictif mais savoir imiter permet de mieux pervertir.

Quand le modèle est jugé suffisamment fidèle à l'original, on peut l'extrapoler puis créer des instruments imaginaires, simulés par l'ordinateur, et impossibles matériellement, comme un tambour dont la membrane est increvable quelle que soit la force avec laquelle on la frappe, une guitare de 15 mètres de long, ... Ces instruments chimériques sont des extensions d'instruments réels ou des instruments fantasmagoriques dont les caractéristiques et la géométrie peuvent varier au cours du temps. Une fois l'instrument modélisé, il est alors possible de découvrir le son qu'il produit.

Cette technique ne cherche pas à créer un modèle « complet » d'instrument mais seulement son état physique dans la situation extrêmement limitée d'une exécution. Si parfois les modèles créés sont trop lourds et coûteux en temps de calcul donc inutilisables en temps réel et peu utiles pour les musiciens, ils permettent néanmoins de décrire et comprendre les phénomènes non linéaires et localisés que l'on trouve dans la plupart des mécanismes excitateurs des instruments.

La synthèse sonore par modélisation physique englobe, en fait, toute une famille de techniques mises au point par différents chercheurs. Celles-ci sont nombreuses, mais toutes ne sont pas aussi connues et peu ont fait l'objet d'applications musicales. Du fait de la nature mathématique de la plupart de ces techniques et du gros travail de programmation qu'elles impliquent, la modélisation physique n'est passée que très lentement des laboratoires aux studios privés. C'est seulement depuis une petite dizaine d'années que des applications satisfaisantes ont été mises au point pour certaines d'entre elles. En général, toutes ces techniques utilisent des algorithmes fondés sur des structures courantes du traitement du signal numérique, comme par exemple les lignes de retard, les filtres ou encore les opérations de consultation de table. Malheureusement ces structures impliquent

un certain nombre de simplifications et les sons produits, tout en ressemblant à ceux d'instruments de musique, ne sont pas toujours d'un très grand réalisme. Cela ne veut pas dire pour autant que ces simulations soient sans intérêt pour la composition. Au contraire, de tels sons extraordinairement flexibles peuvent être tout à fait utiles.

2. Historique

Les concepts, la terminologie et certaines formules employées dans la synthèse par modèles physiques sont issues de modélisations effectuées par des acousticiens et physiciens d'aujourd'hui mais aussi de traités du XIX^{ème} siècle sur la nature du son comme celui de Helmholtz³ ou du début du XX^{ème} siècle tel que *The theorie of sound*⁴ (1894-1945) de Lord Rayleigh.

A l'université de l'Illinois, entre les années 1967 et 1970, Lejaren Hiller, James Beauchamp et Pierre Ruiz sont parmi les premiers à avoir adapté les modèles physiques à la synthèse numérique de la musique en synthétisant des sons d'objets comme des cordes, des barres, des plaques et des membranes mis en vibration par pincement et par percussion. La thèse de Pierre Ruiz, dirigée par Lejaren Hiller, pionnier de la composition assistée par ordinateur, portait sur la simulation des cordes frottées à partir de la résolution d'équations différentielles. Les calculs et la synthèse des sons ont été réalisés aux Laboratoires Bell. Malheureusement le procédé était trop coûteux en temps de calcul et inutilisable avec le matériel informatique de l'époque.

Ercolino Ferreti est un autre pionnier de la synthèse par modèles physiques⁵. Il dirigeait les travaux d'étudiants du MIT de Harvard et de l'université d'Utah dans les années 60 et 70. Puis, encouragé par les premiers résultats, il fonda la société Ferreti-Lay dans le but de commercialiser la musique assistée par ordinateur. La puissance des ordinateurs, comme nous l'avons dit, était alors insuffisante pour obtenir un résultat satisfaisant et la société fut dissoute en 1970.

En 1963, John Kelly, Carol Lochbaum et Max Mathews ont réalisé Daisy, l'air populaire, entièrement par ordinateur. La voix est obtenue par simulation du conduit vocal et cet exemple, qui aujourd'hui fait sourire par son manque de musicalité et sa sonorité « synthétique », revêt une grande importance historique.

³ Parmi ces pionniers du XIX^e siècle qui ont conçu des modèles simulant la physique d'instruments de musique, on peut citer également Mayer, Tyndall, Poynting et Thomson.

⁴ Cet ouvrage énonce les principes de structures vibrantes comme les membranes, les plaques, les cordes, les barres et les coquillages et décrit la physique mathématique de vibration dans l'air libre, dans les tubes et les boîtes.

⁵ Ercolino Ferreti utilise la synthèse par modèles physiques pour la première fois dans son œuvre *Pipe and Drum* de 1963, voir Annexe 1 § 1. Cette œuvre est proposée sur le disque d'exemples sonores (CD1 Plage 1).

A la fin des années 70, Claude Cadoz, Jean Loup Florens et Annie Lucianni⁶, se sont de nouveaux intéressés aux méthodes de synthèse par modèles physiques en associant eux aussi, le phénomène sonore aux vibrations de la structure mécanique qui le produit, et en s'attachant au calcul spatio-temporel de ces vibrations. L'ACROE⁷ met alors en œuvre, entre autres, une architecture informatique originale par sa diversité et sa puissance dans le « number crunching » aussi bien que le temps réel, afin de développer un « outil de création » multi-sensoriel et à retour d'effort. Le programme créé, CORDIS-ANIMA, est basé sur la technique de *synthèse modale*, découverte en 1979, qui consiste en la représentation de structures vibrantes à partir de leurs composants mécaniques élémentaires.

En 1989, Jean-Marie Adrien a développé la *synthèse modale*, qui fut ensuite la base du logiciel MOSAÏC⁸ développé par l'IRCAM, et l'a généralisée à toutes les structures intervenant dans la modélisation des instruments. Adrien a développé les modèles et les algorithmes de synthèse de MOSAÏC sur une période de plusieurs années (1988-1991). Ce système de synthèse modale a été mis en œuvre par Joseph Morrison en 1991. Les recherches et les travaux de développement du système ont été repris à l'IRCAM⁹ en 1994 par René Caussé à la tête de l'équipe de recherche en acoustique instrumentale et par Gerhard Eckel, directeur de l'équipe de recherche dans le développement des représentations sonores. MODALYS¹⁰, le successeur de MOSAÏC, a été étendu à de nouvelles machines et peut être utilisé désormais sur DECStation, DECAIpha, NeXT, SGI, Macintosh et PowerMacintosh, ordinateurs utilisés par l'IRCAM. Aujourd'hui Modalys s'est associé avec le programme Modalyser, mis au point à l'Université du Hertfordshire en Grande Bretagne, et porte le nom de Modalys-ER.

⁶ Pour avoir le détail de leurs travaux, se reporter à :

C. Cadoz, *Synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires, application aux sons musicaux*, mémoire de thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1979.

C. Cadoz, J. L. Florens, A. Lucianni, « Responsive Input Devices and Sound Synthesis by Simulation of Instrumental Mechanisms : the CORDIS System », *Computer Music Journal* v.8 n°3, 1984, p. 60-73, réédité dans C. Roads, *The music Machine*, Cambridge, Massachusett, MIT press, 1994.

⁷ Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression.

⁸ Sur le disque d'exemples sonores sont proposées deux œuvres qui utilisent des sons réalisés avec Mosaïc, *Amers* de Kaija Saariaho (voir Annexe 2 § 3, CD1 Page 26) et *Dans la distance* de François Nicolas (voir Annexe 2 § 4, CD1 Page 27 : œuvre complète. CD1 Page 28 : partie électroacoustique).

⁹ Institut de Recherche et Coordination en Acoustique et Musique

¹⁰ Sur le disque d'exemples sonores sont proposées des sons réalisés avec Modalys (CD1 Page 2 à CD1 Page 25), ainsi que deux œuvres qui utilisent ce programme, *L'Ivresse est un Nombre* (voir Annexe 2 § 5.1, CD2 page 1) et *Fleurs et Insectes* (voir Annexe 2 § 5.2, CD2 page 2) de Guillaume Loizillon.

Parallèlement à ces recherches, Kevin Karplus et Alex Strong ont mis au point, en 1979, une technique¹¹ permettant de produire des sons de cordes pincées, moyennement réalistes, mais nécessitant très peu de calculs. Il était possible de produire 2 ou 3 sons simultanés en temps réel sur un processeur 8080A. Le modèle de Karplus / Strong est une référence historique car c'est le premier exemple d'un nouveau type de synthèse physique. Il a été généralisé de manière à synthétiser le son de n'importe quel instrument. Cette technique générale développée par Julius Orion Smith a pris le nom de *synthèse par guide d'ondes*¹².

Nous reviendrons plus en détail sur toutes ces techniques dans la seconde partie de ce mémoire. Mais, avant, nous nous attacherons à faire l'état de l'art.

¹¹ K. Karplus et A. Strong, « Digital Synthesis of Plucked-String and Drum Timbres », *Computer Music Journal* vol.7 n°2, 1983, p. 43-55, article paru également dans Curtis Roads, *L'audionumérique*, traduit et adapté de l'anglais par Jean de Reydelle, Dunod, Paris, 1999, 679 p.

¹² Sur le disque d'exemples sonores sont proposées quatre œuvres de David Jaffe utilisant la synthèse par guides d'onde, *May all your children be acrobats* (voir Annexe 2 § 8.1, CD2 page 31), *Telegram to the president* (voir Annexe 2 § 8.2, CD2 page 32), *Silicon Valley Breakdown* (voir Annexe 2 § 8.3, CD2 page 33) et *Grass* (voir Annexe 2 § 8.4, CD2 page 34).

3. Etat de l'art

La synthèse par modèles physiques est une technique nouvelle mais en plein développement. Les revues scientifiques comme le *Computer Music Journal* ou les comptes rendus de conférences comme ceux de l'*International Computer Music Conference* présentent de plus en plus d'articles consacrés à la synthèse par modèles physiques, de plus, ces articles sont de plus en plus présentés dans des rubriques dédiées à cette forme de synthèse (voir Figure 1). L'ouvrage remarquable de Curtis Roads, *computer music tutorial*¹³, consacré à la musique réalisée par ordinateur, présente un chapitre entier consacré aux diverses techniques de modélisation physique. Ce domaine fait également l'objet de nombreuses recherches universitaires. Nous pouvons citer entre autres la thèse de Guillaume Loizillon, *Modes de description des sons et synthèse sonore*, réalisée sous la direction de Mme le professeur Eveline Andréani, à l'université de Paris VIII en 1996. Nous pouvons citer également le mémoire de DEA de Marie Dominique Bonnet, *Cordes frottées et informatique*, réalisé en 1993 à l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales avec la collaboration de l'Ircam. Marie Dominique Bonnet prépare actuellement une thèse traitant également de synthèse par modèles physiques sous la direction de Marc Battier.

En France, dans les centres comme L'IRCAM (Paris) ou l'ACROE (Grenoble) les programmes Modalys et Cordis-Anima sont en plein développement, les compositeurs travaillant en collaboration avec ces centres produisent de nombreuses œuvres grâce à ces logiciels de synthèse. Un grand colloque a d'ailleurs réuni à Grenoble, en 1990, tous les chercheurs et compositeurs travaillant sur la synthèse physique. Cette rencontre a donné lieu à une publication intitulée *Modèles Physiques, création musicale et ordinateur*. Dans l'université de Berkeley, et au CCRMA de Stanford, des recherches sont menées sur la synthèse par guides d'ondes. L'université Hertfordshire travaille en collaboration avec l'IRCAM pour le développement de Modalys.

¹³ C. Roads, *Computer Music Tutorial*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1994, p.263-296. Une traduction en français est désormais disponible : C.Roads, *L'audio numérique*, traduit et adapté de l'anglais par Jean de Reydellet, Dunod, Paris, 1999, 679 p.

Année	Nombre de pages total	Nom de la rubrique	Pages consacrées à la synthèse par modèles physiques	Pourcentage de l'ouvrage consacré aux modèles physiques
1986	Aucun article touchant à la synthèse par modèles physiques			
1989	339 pages		P 46-50 P 69-72 P 249-256	5 %
1990	388 pages	Digital signal processing : Analysis/Synthesis. Real-time systems.	P 75-78 P 191-194	2 %
1991	593 pages	Sound synthesis systems	P 19-22 P 293-304	2,6 %
1992	488 pages	Physical Models	P 132-157	5,3 %
1993	476 pages	Physical Modeling	P 32 - 79	10 %
1994	508 pages	Music works Sound synthesis techniques Acoustics and simulaion	P 11-18 P 386-434 P 455-462	12,8 %
1996	511 pages	Physical Modeling and Synthesis	P 1-16 P 224-239 P 444-453	8,4 %

Figure 1 : Evolution du nombre d'articles consacrés à la synthèse par modèles physiques dans les comptes rendus de l'ICMC.

Le fait que les producteurs de synthétiseurs commerciaux s'approprient cette technique est le signe son intérêt, mais cela garantit également son futur développement. En effet, les sociétés comme Korg, Yamaha, Roland ou Technics investissent dans la recherche. La vulgarisation, la popularisation de cette technique passe par sa simplification voir son appauvrissement, néanmoins la synthèse physique trouve ici un moyen de se faire connaître et de mettre en avant ses nombreuses qualités.

II. LES GRANDES TECHNIQUES DE MODELISATION

Parmi les grandes techniques de modélisation, certaines sont destinées à un usage principalement scientifique, comme celle de MacIntyre, Schumacher et Woodhouse. Les autres utilisées à des fins musicales nous intéressent plus particulièrement. Cependant nous prendrons le temps d'examiner la spécificité de la synthèse MSW car elle a apporté beaucoup à la synthèse par modèles physiques : bien qu'il n'y ait pas eu de production sonore, les techniques à vocation musicale s'en sont beaucoup inspirées. Parmi ces dernières nous examinerons plus en détail les techniques de Hiller et Ruiz, pionniers de la synthèse par modèles physiques, les techniques de synthèse modale, Cordis-Anima et Mosaïc, qui font l'objet de nombreuses applications musicales que nous évoquerons au cours de ce mémoire, et la technique de synthèse par guides d'ondes qui elle aussi a donné naissance à plusieurs compositions. Nous examinerons également les productions commerciales faisant usage des techniques de modélisation physique.

1. Les démarches scientifiques et artistiques de modélisation

Les buts recherchés par ces deux démarches de modélisation sont bien distincts. Dans le domaine de l'acoustique physique traditionnelle, la modélisation intervient au terme d'une longue réflexion théorique et expérimentale, pour valider les hypothèses émises. Le modèle est alors créé pour simuler un processus précis qui, en dehors de son intérêt scientifique, reste limité en termes d'applications musicales directes. Réciproquement, une simulation effectuée en vue d'une application musicale prend en compte des comportements, fréquents dans le domaine instrumental ou pourvus d'un intérêt artistique, qui sont parfois inintéressants d'un point de vue physique. Ainsi, certains modèles élaborés dans ce but peuvent aller à l'encontre de la rigueur scientifique ; il est donc nécessaire d'étudier ce genre de modèle par rapport à des situations théoriques et

expérimentales voisines. « Le modèle est alors un outil d'investigation et l'on peut parler d'*expérience informatique*¹⁴ ».

Malgré les oppositions existant entre ces deux démarches, la synthèse par modèles physiques à visée musicale emprunte ou s'inspire souvent des modélisations et simulations numériques développées pour et par des physiciens. La technique de synthèse développée par MacIntyre, Schumacher et Woodhouse est l'exemple représentatif d'une simulation à visées scientifiques qui sera ensuite réutilisée en vue d'une application musicale.

1.1. Exemple de simulation numérique à des fins scientifiques : la technique de MacIntyre Schumacher et Woodhouse

MacIntyre, Schumacher et Woodhouse ont tenté de créer une technique de synthèse efficace et dont les paramètres réglables sont liés à ceux qu'exploitent les musiciens : la synthèse MSW (d'après leurs initiales) ; mais cette technique contrairement à celles que nous décrirons ultérieurement, s'inscrit dans une démarche purement scientifique. Leur modèle du mécanisme de production du son par les instruments, qualifié de « modèle en ondes progressives » par J. M. Adrien¹⁴, est élégant quoique très simplifié. Son but est de valider les hypothèses scientifiques émises.

Les trois chercheurs se basent sur des expériences récentes ou des travaux antérieurs qui, comme ceux de Benade¹⁵, ont mis en évidence l'importance des fréquences résonnantes dans la détermination du son des instruments. Cependant ces fréquences résonnantes ne peuvent expliquer la présence des transitoires d'attaque pourtant fondamentaux dans la reconnaissance du timbre. MacIntyre Schumacher et Woodhouse s'attacheront donc à expliquer ce phénomène ainsi que d'autres comme l'effet de bémolisation et les sous-harmoniques. Ils émettent l'hypothèse que ce sont les mouvements des vibrations qui génèrent les sons des bois, des tuyaux d'orgue et des cordes frottées. Ils étudient donc les mécanismes physiques qui sont responsables de la naissance des ondes et de leur évolution, ainsi que le détail du comportement temporel des sons.

¹⁴ J. M. Adrien, *Etude de structures complexes vibrantes, application à la synthèse par modèles physiques*, mémoire de thèse de doctorat, Université de Paris VI, Paris, 1989, p. 6.

¹⁵ Pour les lecteurs qui désirent connaître le détail des travaux de Benade, se reporter aux sources suivantes : A. Benade, « The physic of wood winds », 1990, réédité dans C. M. Hutchins, *The physic of music*, Freemann, San Francisco, 1978, p. 34-43.
A. Benade, *Fundamentals of Musical Acoustics*, Dover Publications, New York, 1900.

1.1.1. Principe théorique de la synthèse MSW

MacIntyre Schumacher et Woodhouse divisent la production du son en deux étapes : une *excitation non-linéaire*, c'est à dire qui, si elle dépasse certaines valeurs, provoque un changement de réaction, comme si un commutateur était actionné, et, une *résonance linéaire*, c'est à dire qui réagit en proportion de la quantité d'énergie qui lui est appliquée.

Dans une clarinette, l'anche est un système non-linéaire : l'anche légèrement entrouverte au départ laisse passer l'air, mais l'air accumulé dans la perce provoque une pression et la fermeture de l'anche. L'air peut alors s'échapper de la clarinette à une vitesse qui dépend de la longueur du tube, et l'anche s'ouvre de nouveau. L'anche convertit le souffle continu en bouffées d'air dont la fréquence dépend de la longueur de la perce, variant avec l'ouverture et la fermeture des trous. On peut donc dire que la perce l'emporte sur l'anche pour déterminer la hauteur des sons. Cette interaction constitue une sorte de rétroaction entre résonateur et exciteur. Cette même non-linéarité se produit lorsque l'archet « capture » la corde du violon jusqu'à ce qu'elle glisse et soit « relâchée » par l'archet ou lorsqu'un flux d'air va et vient de part et d'autre du biseau d'un tuyau d'orgue.

L'excitation est donc un mécanisme de commutation non-linéaire qui envoie une onde transitoire de type impulsionnel dans la partie linéaire de l'instrument. Celle-ci agit comme un filtre qui arrondit la forme de l'onde afin de produire le timbre. Cette conceptualisation tend vers une interprétation unique du phénomène sonore et entraîne certaines simplifications.

1.1.2. La modélisation MSW

Chaque instrument est représenté par un ensemble compact d'équations. L'excitation, non-linéaire nécessite des équations plus complexes et plus spécifiques. Les principales variables sont la source d'énergie, l'énergie fluctuante de l'élément non-linéaire et la fonction de réflexion décrivant le filtrage effectué par la partie linéaire.

La simulation de MacIntyre Schumacher et Woodhouse permet d'expliquer le détail de la formation du son dans divers instruments. Malheureusement les multiples simplifications apportées à des fins d'efficacité et de généralité ne permettent pas à la synthèse MSW de produire des sons réalistes. De nombreuses améliorations seraient nécessaires pour cela, d'ailleurs on remarquera que le dispositif utilisé ne comporte aucun

moyen de génération sonore. Ainsi les applications musicales de cette synthèse restent rares, mais cette démarche purement scientifique reste intéressante car ses résultats seront utilisés, parallèlement à ceux de Karplus et Strong, pour la mise au point de la synthèse par guide d'ondes. D'ailleurs le modèle de Karplus / Strong a été reconnu comme un cas particulier des modèles physiques pour cordes de MacIntyre, Schumacher et Woodhouse.

2. Approche classique de la synthèse par modèles physiques : Les travaux de Hiller et Ruiz

Les travaux de Hiller et Ruiz (1971) sont représentatifs de l'approche dite « classique » de la modélisation physique, et bien que de nombreux autres chercheurs aient repris cette méthodologie, nous nous fixerons sur ces deux chercheurs afin de comprendre les bases de cette approche.

La méthodologie de Hiller et Ruiz se décompose en cinq étapes : Tout d'abord, il est nécessaire d'indiquer les *dimensions et les constantes physiques* de l'objet vibrant. Car, comme pour un instrument acoustique, la nature de l'objet, corde, tube, plaque, membrane ou autre, ses dimensions, son élasticité dans le cas d'une corde, définiront la nature du son produit. Il convient, ensuite, d'indiquer les *conditions limites* auxquelles peut être soumis l'objet : tension à laquelle une corde risque de se rompre, force limite que peut supporter une membrane sans crever... Ses valeurs extrêmes ne pourront pas être dépassées par les variables. Curtis Roads indique que ces « conditions limites permettent également de prendre en compte les cas où le système ne s'est pas totalement stabilisé après avoir reçu une entrée¹⁶ ». Il faut indiquer l'*état initial* de l'objet comme par exemple la position de départ d'une corde au repos. L'*excitation* est ensuite décrite, grâce à des algorithmes, comme une force (possédant une direction, une intensité et un point d'application définis) à laquelle l'objet est soumis. Les caractéristiques de l'excitateur : archet, mailloche, marteau, plectre, ... sont également indiquées dans les algorithmes. Enfin, le *comportement transitoire* de l'objet, dont l'irrégularité est due à des facteurs comme le frottement et la manière dont le son est rayonné, constitue une limitation supplémentaire des conditions de vibration indiquées et permet d'insuffler une « vie » à un son qui serait autrement trop plat.

A l'issue de ces cinq étapes de description de l'objet, on obtient un système d'équations complexe qui constitue le modèle physique de l'instrument. Pour obtenir un son, il est alors nécessaire d'indiquer les valeurs de l'excitation (pour une corde frottée : place du doigt sur la corde, place de l'archet, pression exercée par celui-ci, vitesse du mouvement,...). Le système d'équations est ensuite résolu par approximations successives.

¹⁶ C. Roads, « Initiation à la Synthèse par Modèles Physiques », *La synthèse sonore, Cahier de l'IRCAM n°2*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, 1993, p. 149 (traduit de l'anglais par Jacqueline Henry).

On obtient, alors, comme solution, une valeur précise pour chaque instant donné. Ces valeurs d'échantillons discrètes représentent la pression acoustique à chaque instant donné.

Cette « approche classique » de la modélisation physique met en jeu un ensemble d'*équations différentielles* fondées sur le *paradigme à masses et ressorts*. Ces deux notions de base ont été reprises dans d'autres simulations plus récentes, nous prendrons donc le temps de les décrire plus en détail.

2.1. Equations différentielles

Comme nous l'avons vu précédemment, dans l'approche classique de la modélisation physique, les valeurs discrètes de la pression acoustiques sont obtenues par résolution d'équations complexes qui sont des *équations différentielles*.

La résolution de nombreux problèmes de mécanique nécessite celle d'une équation faisant intervenir la position d'un point (x), sa vitesse (dx/dt) et son accélération (d^2x/dt^2). La vitesse et l'accélération sont les dérivées première et seconde de x . C'est là, la définition même d'une équation différentielle : faire intervenir des différences et des dérivées de fonctions. Ces équations permettent de décrire l'évolution d'un objet vibrant dans l'espace et dans le temps. Elles peuvent servir aussi à décrire le fonctionnement d'un filtre numérique. La première application des équations différentielles, par Joseph Bernoulli en 1832, fut la simulation d'une corde vibrante de longueur finie, technique au cœur de la synthèse des modèles physiques. Pour modéliser un phénomène donné, il est d'abord nécessaire de trouver le plus petit nombre de variables permettant de décrire avec exactitude l'état de ce phénomène. Ensuite, il faut établir les équations différentielles les plus simples possibles, traduisant les lois physiques régissant l'évolution de ces variables. Certaines équations différentielles ont des solutions globales, mais la plupart des systèmes d'équations interdépendants, utilisés dans le domaine de la modélisation physique, sont trop complexes et doivent être résolus par approximations successives, ce qui nécessite beaucoup de temps. Pour parvenir à une solution, il convient d'abord de faire une hypothèse, puis de l'améliorer par itération.

2.2. Paradigme à masses et ressorts

Depuis longtemps, les modèles à masses et à ressorts sont utilisés par les physiciens pour décrire des objets vibrants et les ondes qu'ils émettent. Ce paradigme met en avant deux qualités essentielles des objets vibrants : leur *densité*, masse par quantité unitaire du corps vibrant, ici modélisée par un nombre de masses réparties sur une longueur donnée, et leur *élasticité* ou raideur, modélisée par des ressorts joignant les masses (voir Figure 2).



Figure 2 : Corde modélisée par un ensemble de masses reliées par des ressorts.

Dans le cas d'une corde, si celle-ci est écartée de son point d'équilibre, une force contraire apparaît et tend à ramener la corde à sa position initiale : la corde se met donc à vibrer. Si la corde est pincée, c'est à dire que l'on déplace une masse, celle-ci exerce une tension sur les masses voisines qui à leur tour se déplacent et ainsi de suite selon un principe appelé propagation des ondes. Ces différentes masses, du fait de leur inertie, ne se déplacent pas toutes instantanément, l'onde se déplace donc le long de la corde avec une vitesse particulière.

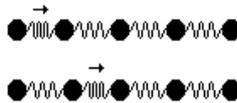


Figure 3 : Onde longitudinale, la première masse est déplacée vers la droite, le ressort se comprime et exerce une force sur la deuxième masse qui se déplace à son tour vers la droite, etc.

Avec ce système à masses et ressorts, il est possible de modéliser une onde longitudinale : dans ce cas les masses se déplacent dans le sens de propagation de l'onde (voir Figure 3). Il est également possible de modéliser la propagation d'une onde transversale, dans ce cas le déplacement initial est perpendiculaire au sens de propagation de l'onde (voir Figure 4). C'est le principal mode de vibration des cordes pincées, frottées ou frappées. La vibration de la corde par torsion n'est généralement pas modélisée par la synthèse physique. La division de la corde en unités discrètes (masses) permet de modéliser l'excitation sous la forme d'une force qui s'applique à une seule masse et se propage ensuite aux autres masses. C'est la résolution de l'ensemble des équations différentielles modélisant la corde qui permet de connaître sa forme à un instant donné.

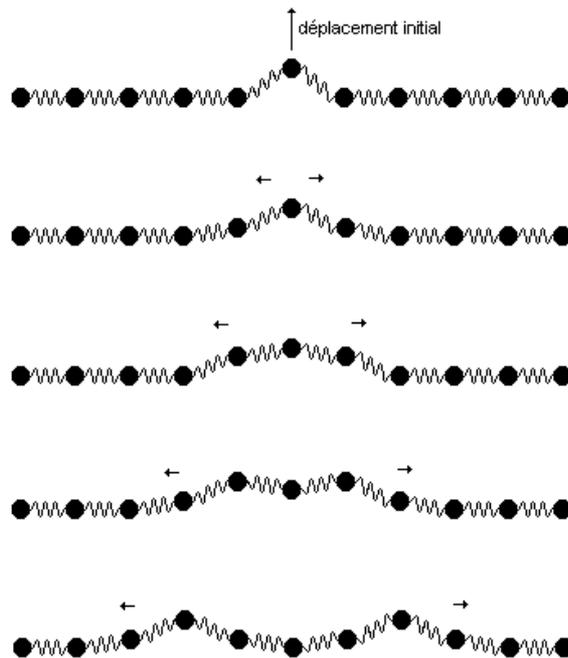
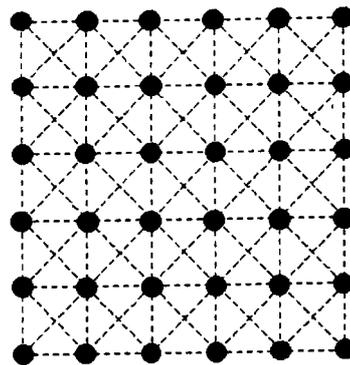


Figure 4 : Onde transversale.

Les surfaces et les volumes peuvent être également modélisés grâce aux masses et aux ressorts. Les surfaces sont représentées sous forme d'un réseau de masses reliées par des ressorts (voir Figure 5). Dans le cas d'une membrane circulaire de tambour, les masses sont disposées en « étoile » (voir Figure 6). Les volumes, eux, sont modélisés sous forme de treillis (voir Figure 7) où chaque masse est reliée par six liaisons.

Figure 5 : Surface modélisée sous forme d'un réseau de masses reliées par des ressorts.¹⁷

¹⁷ Graphique extrait, tout comme ceux des figures 5 et 6, de C. Roads, « Initiation à la Synthèse par Modèles Physiques », *La synthèse sonore, Cahier de l'IRCAM n°2*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, p. 154.

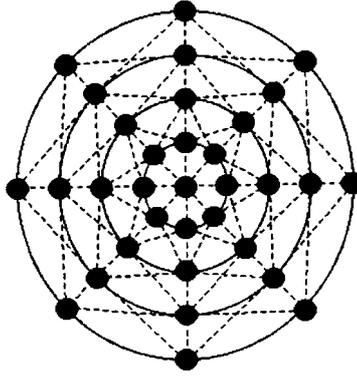


Figure 6 : Modélisation d'une membrane de tambour.

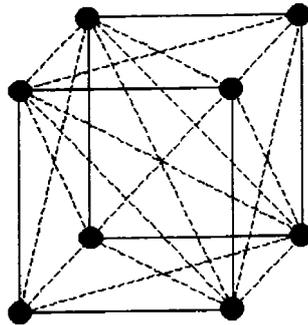


Figure 7 : Volume modélisé sous forme d'un treillis de masses reliées par des ressorts.

L'inconvénient majeur de la synthèse de Hiller et Ruiz est son coût, dû à la masse de calculs qu'elle nécessite. J.-M. Adrien critique les méthodes d'analyse qui précèdent l'élaboration du modèle mathématique.

« Les limites de l'approche de Hiller et Ruiz résultent du fait que les solutions analytiques sont de manière générale, trop arbitraires et insuffisantes à l'oreille ou trop complexes et inutilisables en pratique. Les auteurs négligent donc les possibilités de leur modèle en matière de contrôle, et réduisent ses performances en matière de transitoires.¹⁸ »

La *synthèse modale* est une solution de rechange au paradigme des masses et ressorts, elle a de plus l'avantage d'être plus souple que la première. Nous allons donc maintenant nous intéresser à cette technique.

¹⁸ J.-M. Adrien, *Etude de structures complexes vibrantes, application à la synthèse par modèles physiques*, mémoire de thèse de doctorat, Université de Paris VI, Paris, 1989, p. 6.

3. La synthèse modale

La synthèse modale est une approche de la synthèse par modèles physiques différente du paradigme à masses et ressorts. Elle est fondée sur deux contraintes primordiales, afférentes au dispositif de contrôle et à la qualité sonore, qui ont motivé l'utilisation du formalisme modal. Ces contraintes sont d'une part de pouvoir appliquer aux modèles de simulation tous les gestes instrumentaux présents dans les modes de jeu d'instruments traditionnels et d'autre part d'obtenir un son le plus proche possible de son modèle acoustique. Dans un contexte musical, il est évident que ces deux contraintes sont nécessaires mais pas suffisantes. En effet, toute technique de synthèse doit pouvoir offrir au compositeur, non seulement la possibilité de simuler des sons existants, mais aussi et surtout de pouvoir effectuer des transgressions et des dépassements des modèles établis. Ainsi, les programmes de simulation doivent posséder une capacité d'extension des possibilités naturelles des instruments, au niveau des contrôles mais aussi de la construction même des structures instrumentales. Les extensions ne sont possibles que si les structures possèdent flexibilité et modularité, une homogénéité de représentation de toutes les structures vibrantes est donc indispensable, permettant ainsi d'accroître, par assemblage, les possibilités d'utilisation des modèles. De plus, pour une efficacité optimale, il est nécessaire de minimiser le coût informatique en temps de calcul et en complexité algorithmique.

Comme l'explique F. Crawford, un système complexe peut-être découpé en éléments simples qui ont les mêmes propriétés que l'ensemble : c'est là la base même de la synthèse modale.

« Le mouvement d'un système compliqué comportant de nombreuses parties mobiles peut toujours être vu comme composé de mouvements plus simples, appelés modes, qui ont lieu tous à la fois. Quelle que soit la complexité du système, on s'aperçoit que chacun de ses modes a des propriétés très semblables à celles d'un oscillateur harmonique simple¹⁹ ».

¹⁹ F. Crawford, *Waves*, Berkeley Physics Course Volume 3, McGraw-Hill, New York, 1968 (traduit de l'anglais par Jacqueline Henry), cité dans C. Roads, « Initiation à la Synthèse par Modèles Physiques », *La synthèse sonore, Cahier de l'IRCAM n°2*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, 1993.

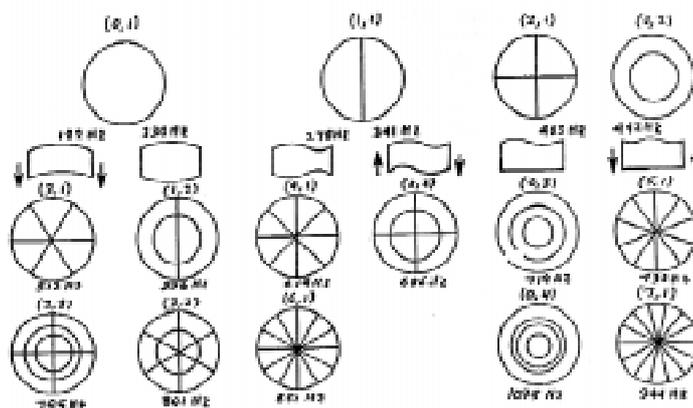
L'objet est donc représenté comme un ensemble de sous-structures vibrantes dont le nombre est bien moins important que celui des masses et des ressorts. Ces sous-structures sont des cordes, des embouchures, des tubes, des archets, etc. qui réagissent à des excitations extérieures (souffle d'air, frappe...). La synthèse modale définit chaque sous-structure grâce à un ensemble d'informations dites données modales. Ces données modales sont un ensemble de coordonnées représentant la forme des *modes vibratoires*²⁰ de l'objet, ainsi que les fréquences et coefficients d'amortissement de ses modes de résonance. Ainsi, les équations décrivant l'objet, ne représentent pas l'objet lui-même mais la façon dont il est susceptible de vibrer. « La vibration totale instantanée d'un instrument est donc exprimée comme la somme des contributions de ces modes²¹ ».

Dans le cas où les sous-structures vibrantes sont simples, les données modales sont obtenues sous forme d'équations dans les traités théoriques de mécanique. Si, ces structures sont complexes, les données sont découvertes par expérimentation sur des

²⁰ La vibration de la corde est complexe, elle est composée du fondamental (note que l'on entend) et des harmoniques (2^{ème} mode vibratoire = partiel 2 ; 3^{ème} mode vibratoire = partiel 3 ; etc...). Lorsque le violoniste pose son doigt sur une corde, il la divise de manière à privilégier un de ces modes vibratoires, c'est à dire, un de ces harmoniques.

Voici par exemple les modes de vibration d'une caisse claire, les chiffres (nombre de diamètres nodaux, nombre de cercles nodaux) placés au dessus, désignent chaque mode particulier, et leur fréquence est indiquée au dessous :

(Schéma extrait du colloque « *Modèle physique, création musicale et ordinateur* » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. I, p. 94.)



Ces différents harmoniques sont parfois appelés *modes vibratoires d'octave* pour éviter toute confusion avec les vibration longitudinale, de torsion et transversale. En effet, une corde vibre de plusieurs façons simultanément. Elle à une *vibration transversale* (voir Figure 4, p. 28). Mais, du fait qu'elle décrit un fuseau en vibrant, la corde subit aussi des allongements périodiques : c'est la *vibration longitudinale*. Ce fuseau décrit par la corde n'est pas à 2 mais à 3 dimensions, la cordes tourne donc périodiquement autour de son axe, à la manière d'une corde à sauter : c'est la *vibration de torsion*. Ces deux derniers modes de vibration ne sont pas réellement perçus mais colorent le timbre.

²¹ C. Roads, « Initiation à la Synthèse par Modèles Physiques », *La synthèse sonore, Cahier de l'IRCAM n°2*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, p. 155.

instruments réels. Le facteur favorable à la synthèse modale est que les chercheurs disposent déjà d'une méthodologie d'analyse des modes vibratoires, qui a de nombreuses applications industrielles et peut être utilisée pour la synthèse du son, et d'outils pour ce genre d'analyse mécanique comme des transducteurs²² et des logiciels d'analyse.

La synthèse modale est plus souple que la technique à masses et ressorts. En effet, il est par exemple possible d'ajouter ou de supprimer des sous-structures dans le temps (pour simuler le changement de taille d'un instrument en cours de jeu) ou bien de faire des interpolations entre deux instruments en combinant les sous-structures de façon non-naturelle, etc.

La *synthèse modale* fut découverte en 1979 par l'équipe de l'ACROE²³ qui l'inclut dans le système Cordis-Anima. En 1989, Jean-Marie Adrien a utilisé et développé cette technique qui fut ensuite la base du logiciel MOSAÏC, développé par l'IRCAM.

Mosaïc a aujourd'hui évolué et a été renommé Modalys (pour éviter toute confusion avec le navigateur Internet, Mosaic). Pourtant c'est Mosaic que nous décriront plus en détail par la suite, premièrement parce qu'il est plus aisé de comprendre le principe de cette technique à travers cette version plus simple du programme, et deuxièmement parce que des compositeurs, comme Kaija Saariaho dans *Amers*²⁴, ont utilisé ce programme sous cette forme ancienne. Evidemment, nous n'omettrons pas de montrer en quoi Modalys représente une amélioration de MOSAÏC et quels sont les perfectionnements que les équipes de l'IRCAM mettent au point actuellement.

Mais avant de décrire ce système développé à l'IRCAM, nous commencerons, dans l'ordre chronologique par présenter Cordis-Anima.

²² Ces transducteurs peuvent être, par exemple, des capteurs piézo-électriques qui transforment les vibrations en signaux électriques.

²³ Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression, Grenoble.

²⁴ *Amers* de Kaija Saariaho figure sur le disque d'exemple sonore (voir Annexe 2 § 3, CD1 Page 26).

3.1. CORDIS-ANIMA

CORDIS-ANIMA est un système de modélisation et de simulation d'objets physiques en temps réel, basé sur la simulation de structures vibrantes à partir de mécanismes élémentaires. Ces objets sont visibles, audibles et manipulables (des informations gestuelles peuvent être envoyées de l'opérateur vers l'objet mais également de l'objet vers l'opérateur, grâce à des interfaces tactiles à retour d'effort). Développé par l'ACROE depuis 1978, par Claude Cadoz, Annie Luciani et Jean Loup Florens, ce programme constitue un outil informatique pour la création musicale et la création d'images animées. CORDIS est dédié à cette première fonction et ANIMA à la seconde, mais les deux ont en commun une base matérielle et conceptuelle importante. Le but de CORDIS-ANIMA est de produire des répliques virtuelles d'objets du monde réel, et de permettre une simulation totale des phénomènes produits par l'objet, mais aussi une simulation de l'objet lui-même.

Pour réaliser la simulation d'un objet physique, il est nécessaire de connaître, parmi ses attributs et propriétés, ceux qui ont une incidence sur la production et le contrôle des phénomènes sensibles. Il faut ensuite que cette connaissance permette de réaliser un programme qui produira la simulation. Le modèle joue le rôle d'un intermédiaire permettant de décrire et caractériser les connaissances utiles. CORDIS-ANIMA a pour première fonction de nous permettre de réaliser ce modèle. Les modules et les fonctions utilisés, sont les éléments même de la modélisation mais aussi ceux de la simulation, en effet, CORDIS-ANIMA est également un système d'algorithmes élémentaires de simulation.

CORDIS-ANIMA permet de décrire puis reconstruire des objets à l'intérieur de l'espace virtuel de simulation. Il permet également de construire des objets qui n'ont pas d'équivalent dans le monde réel. En cela, CORDIS-ANIMA est un langage et comme tout langage : un moyen de création.

3.1.1. Les modules physiques

Le formalisme général de CORDIS-ANIMA est issu de deux impératifs initiaux, l'un matériel : la nécessaire discrétisation et la finitude des communications entre l'ordinateur et l'univers réel. L'autre résulte d'un choix : c'est celui de la *modularité* et surtout de « *l'experimentabilité* » ou de la « *physicalité* » des modules.

La simulation d'un objet n'a d'intérêt que si une communication sensible est établie entre l'opérateur et cet objet. Cependant, cette simulation est établie grâce à l'ordinateur et toute communication devra être réduite à des courants électriques, c'est à dire des signaux uni- voir multidimensionnels en nombre limité. Il en résulte une contrainte dans les processus de communication : la communication entre l'opérateur et le modèle ainsi que la communication entre les éléments de l'objet simulé, devront être *discrètes et de dimension finie*. Toute communication devra donc être idéalisée et représentée sous forme d'un message mécanique ponctuel.

Dans la réalité, les communications entre objets physiques sont non-orientées et font intervenir deux variables duales : l'une intensive (une force ou une intensité F), l'autre extensive (un déplacement ou une déformation X). Or la communication entre les objets simulés est forcément *unilatérale*, c'est à dire à un seul sens : entrée ou sortie. On est donc contraint de représenter toute communication sous forme *bidirectionnelle*, grâce à des paires indissociables d'entrées et sorties. On est donc amené à séparer les deux variables duales et à les affecter aux deux éléments de la paire. On obtient alors deux situations possibles : soit on a une force en entrée et une position en sortie, on appelle M ce point de communication, soit on a la situation inverse et l'on nomme L ce deuxième point de communication (voir Figure 8). Ces deux types de points constitueront la base du formalisme CORDIS-ANIMA.



Figure 8 : Représentation des points L et M.

La construction d'un objet à partir de ces éléments de base L et M se fait en établissant un lien entre eux. Ce lien est un échange d'informations qui se fait par les

entrées et sorties des points M et L (voir Figure 9). Ainsi, un point M peut recevoir les sorties de force de plusieurs points L : il reçoit, en entrée, une force dont la valeur est égale à la somme des forces de sortie des points L (voir Figure 10). Par contre, un point L ne peut recevoir qu'une sortie de position d'un point M, car il n'existe aucun moyen, ayant un sens physique, qui permet de combiner plusieurs positions différentes. Il va de soi que deux points M ou deux points L ne peuvent être connectés ensemble.

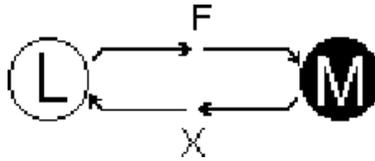


Figure 9 : Connexion d'un point L avec un point M.

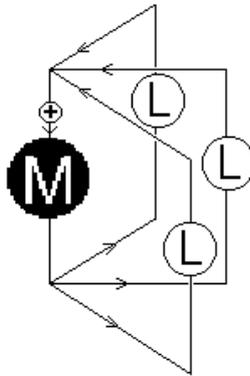


Figure 10 : Connexion d'un point M avec plusieurs points L.

L'ensemble de ces points, connectés entre eux, forme un réseau. La structure obtenue peut être unidimensionnelle, bidimensionnelle voir tridimensionnelle. Les variables circulant par les points de communication peuvent être les coordonnées d'un point ou les composantes de force sur un axe, dans un plan ou dans l'espace. Des interfaces (ou transducteurs) permettant un contact sensible entre l'opérateur et l'objet simulé sont également représentées dans l'*objet complet*. On leur associe des modules spécifiques chargés d'évoquer leur présence, et leurs liaisons avec le reste des constituants de l'objet permettent la circulation des informations venant de l'objet lui-même ou de l'opérateur. Lorsqu'on parle de la partie purement numérique de l'objet, on parle d'*objet interne*.

Le principe de combinaison des modules exposé ci-dessus, permet une certaine généralité, c'est à dire la possibilité de construire, à partir d'un ensemble limité d'éléments différents, une grande variété d'objets. CORDIS-ANIMA tient son fondement même dans le fait que les modules constituant l'objet, sont de même nature que l'objet. Cela signifie

que tous les modules formant l'objet simulé, même s'ils ne correspondent à aucun objet existant, ont une réalité physique expérimentale et sont accessibles à nos sens. Un objet global est alors un ensemble de sous-objets entre lesquels sont établies des communications spécifiques de même nature qu'entre l'opérateur et l'objet global. Néanmoins, pour former des objets complexes, un autre type de liaison est nécessaire : une liaison fixe entre deux points L, car toute autre liaison ne permettrait que des figures limitées (voir Figure 11 et Figure 12).

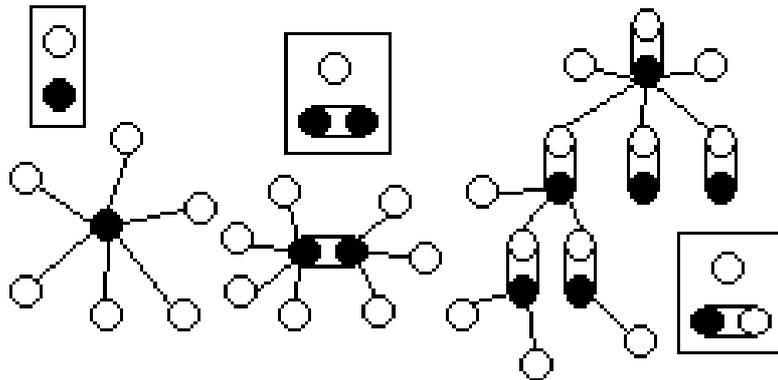


Figure 11 : Types de liaisons induisant des figures limitées.

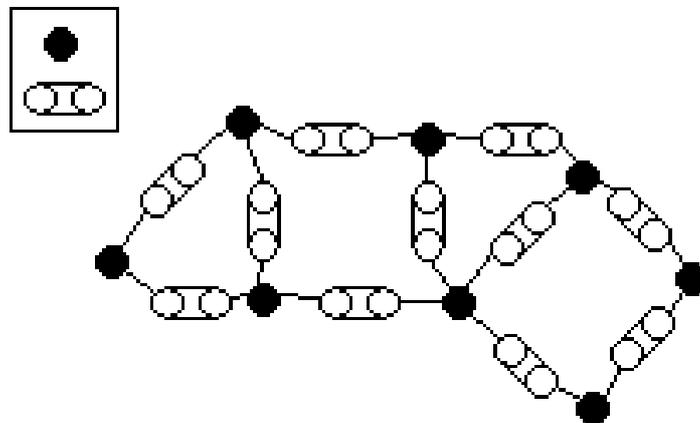


Figure 12 : Liaison permettant toutes les figures possibles.

Les points M jouent donc le rôle de grains de matière, positionnés dans un espace tridimensionnel (ou plus simplement bi- ou unidimensionnel), alors que les points L tiennent le rôle d'éléments de liaison, calculant les forces agissant entre ces points. Il ressort de ce cadre formel que la simulation numérique nous impose une discrétisation des éléments physiques et des communications qui ont lieu entre eux ainsi qu'entre l'opérateur

et l'un d'eux. L'art de la simulation est de jouer avec notre propre système de perception pour nous donner l'impression d'un phénomène continu.

3.1.2. Les modules fonctionnels

En dehors des *modules physiques* formés de points L et M, un autre type de module est employé pour permettre la formation d'objets complexes. Ces *modules fonctionnels* qui ne manipulent pas uniquement des variables physiques et ne répondent pas obligatoirement à un modèle physique immédiat sont utilisés aux côtés des autres modules et permettent d'étendre considérablement les possibilités de représentation. Le nombre de ces modules fonctionnel est très important et l'opérateur peut aussi, s'il le désire, en créer de nouveaux, je n'en décrirai donc que trois qui sont les plus utilisés et qui permettent de comprendre en quoi ils augmentent les possibilités de simulations.

Les *modules de variation structurelle dynamique* ont pour fonction de faire passer l'objet d'un réseau d'interconnexions entre ses composants à un autre, durant la simulation. Ces modules possèdent, comme les objets, un ou plusieurs points de connexion. Ils possèdent également des sorties logiques, dont les valeurs sont booléennes et qui permettent, en fonction des ordres donnés d'établir ou non les connexions. L'action d'un de ces modules de variation structurelle dynamique peut être déclenchée par une variation interne de l'objet auquel il est connecté ou bien provoquée par l'intervention de l'opérateur.

Les *modules de variation paramétrique dynamique* n'agissent pas sur la structure de l'objet mais sur la valeur de ses paramètres pendant la simulation (plus précisément sur les paramètres de l'algorithme qui définit cet objet). Pour chaque objet, tous les paramètres sont modifiables, par l'opérateur ou par l'objet lui-même, en dehors du temps de la simulation ; mais seuls certains paramètres²⁵, choisis à l'avance, sont modifiables pendant la simulation grâce à ces modules fonctionnels. Par exemple, ceci permet de faire grossir un gong pendant sa résonance pour obtenir un effet de glissando (effet employé par Kaija Saariaho dans *Amers*).

Les *modules de changement de point de vue relatif* permettent de changer la « taille » relative des objets entre eux ou par rapport à l'opérateur. Lors de la modélisation

²⁵ Il faut préciser qu'à priori, tout module est doté de paramètres, mais le contrôle dynamique de ces derniers n'est pas toujours justifié, aussi est-il préférable d'effectuer un choix.

d'un objet, il est évident qu'un rapport d'échelle doit être établi entre les parties de l'objet mais également entre l'opérateur et cet objet. Ce module fonctionnel permet de changer ce rapport d'échelle, ce qui peut donner la sensation à l'opérateur que l'objet ou une de ses parties change de taille. Ce module se place entre deux sous-structures déjà définies et agit à la manière d'un « convertisseur » avec des facteurs multiplicatifs. Il permet de changer l'échelle des informations, des variables, forces et déplacements avant de les associer à leurs transducteurs respectifs. Ce module fonctionnel peut être également utilisé pour distribuer la variable « sortant » d'un module aux entrées de plusieurs autres modules (voir Figure 13).

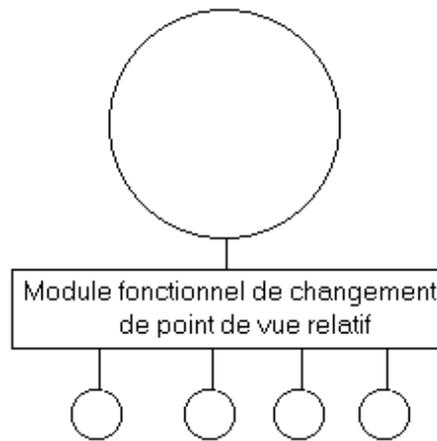


Figure 13 : Connexion d'un module aux entrées de plusieurs autres modules.

3.1.3. Les algorithmes élémentaires de CORDIS ANIMA

Ce sont les systèmes d'algorithmes qui vont permettre de calculer les différents états de l'objet dans le temps. C'est eux qui constituent la simulation en elle-même. Les principes énoncés précédemment ne constituent que le cadre formel de cette simulation. Le défi à relever est de construire ces algorithmes uniquement à partir des atomes, *points matériels* et *éléments de liaison*, et de trouver le meilleur *principe d'économie* à chaque niveau de cette construction. Pour établir ces algorithmes on peut traduire en équations physiques les comportements de l'instrument ou de l'objet réel étudié. « L'algorithme est, en quelque sorte, la vérification de l'équation ainsi transposée en temps et espace discrets

et variables quantifiées, pour toutes les valeurs (discrètes) consécutives du temps²⁶ ». L'inconvénient de cette méthode c'est que l'on risque de s'encombrer de propriétés qui ne sont pas particulièrement pertinentes pour obtenir la qualité du son souhaitée. Une autre possibilité est de partir de la machine. Cette méthode consiste à créer un algorithme le plus économique possible en variables, opérations, etc. qui peut être associé à l'objet de référence. Cette démarche va à la rencontre de l'autre et « par ailleurs, elle pose plus explicitement le problème de la représentation des objets à l'aide des processus numériques²⁶ ». C'est celle-ci qui a été choisie pour réaliser les algorithmes de CORDIS ANIMA.

« Nous cherchons à réaliser un processus dont la structure est permanente, capable d'évoluer de lui-même mais aussi sous l'influence d'un phénomène extrinsèque²⁶ ». Ce processus, c'est l'instrument capable de vibrer seul après une excitation ponctuelle ou de répondre à une excitation continue. La suite des états de l'objet sera représentée par une suite de valeurs chiffrées, calculées, issues de l'algorithme. Le principe d'économie consiste ici à utiliser pour chaque état, les valeurs utilisées lors des états précédents pour ne pas avoir à en créer d'autres, d'en utiliser le moins possible pour économiser la place nécessaire au stockage de ces valeurs, et de les tirer des états passés les plus proches pour ne pas avoir à les stocker longtemps. Le paradigme des suites récurrentes s'impose naturellement pour traduire un tel processus.

Cependant, les valeurs des états précédant et les paramètres venus de l'extérieur (actions de l'opérateur) ne sont pas suffisants pour obtenir des phénomènes variés. Il faudra donc introduire des *paramètres algorithmiques* que l'on réunit sous le terme de *filtre numérique*²⁷.

Une première forme de calcul, linéaire, permet de décrire les composants de catégorie linéaire. Les formules établies permettent d'englober les comportements mécaniques fondamentaux comme le point fixe, le ressort, le frottement, l'inertie, l'oscillateur harmonique. Dans un souci de simplification, la matière est concentrée dans

²⁶ C. Cadoz, J. L. Florens, A. Lucianni, « CORDIS-ANIMA : système de modélisation et de simulation d'instruments et d'objets physiques pour la création musicale et l'image animée » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, Paris, 1994, vol. II, p. 609.

²⁷ Le filtre numérique est un « programme » informatique qui permet d'arrêter une partie des oscillations acoustiques, il peut être réglé de manière à constituer un filtre passe-bas, passe-haut, passe-bande ou un filtre plus complexe. La synthèse soustractive, par exemple, utilise un filtre numérique pour éliminer d'un son très riche, les fréquences inutiles, de manière à ne conserver que les constituants du son désiré.

des points matériels et donc assimilée à des *masses ponctuelles*, les éléments de liaison régissent uniquement les interactions entre ces points et sont assimilés à des *liaisons mécaniques idéalisées*. Les trois éléments fondamentaux de CORDIS ANIMA sont donc, le *ressort*, le *frottement* et la *masse*. Ils peuvent être réduits à seulement deux en regroupant le ressort et le frottement dans un *module de liaison mécanique*. Voici la représentation de ces deux types de modules (voir Figure 14) :

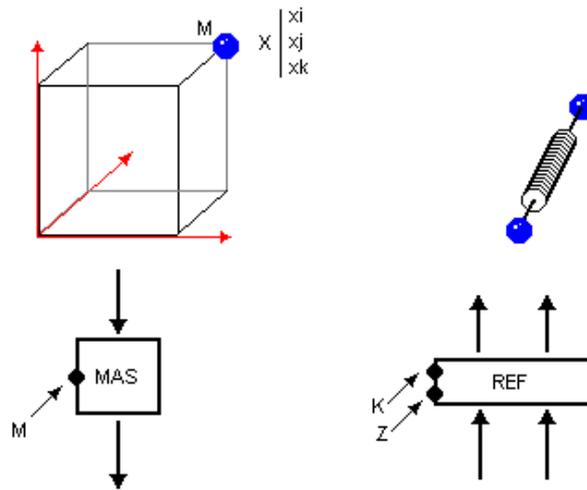


Figure 14 : Représentation des deux modules physiques élémentaires (masse et module de liaison mécanique), leur introduction dans le formalisme et leurs paramètres contrôlables : M =masse, X =vecteur position, K =constante de raideur du ressort, Z =constant

Les seuls éléments présentés jusqu'à maintenant n'offrent que des possibilités limitées et il est nécessaire de faire intervenir des non-linéarités dans l'objet physique : « si le dispositif global est rigoureusement linéaire, on ne peut espérer, par exemple lui faire produire des vibrations sonores à partir d'actions gestuelles puisque celles-ci sont par essence non-audibles²⁶ ». De plus un objet constitué de composants uniquement linéaires serait monolithique.

L'organisation, en structures à trois dimensions, des éléments énoncés précédemment introduit déjà une première forme de non-linéarité. En outre les contrôles structurels et paramétriques dynamiques offrent deux autres catégories de non-linéarités. Pourtant, certains phénomènes spécifiques, comme la relation qui s'instaure entre la corde et le crin d'un archet, ne peuvent être modélisés à l'aide de ces seules ressources. C'est pour cette raison que, dès les premières versions de CORDIS ANIMA, la notion de *liaison conditionnelle* a été introduite. Celle-ci permet en outre de considérer des morceaux

distincts susceptibles d'interagir entre eux, autant pour les objets visibles animés que pour les objets audibles manipulés.

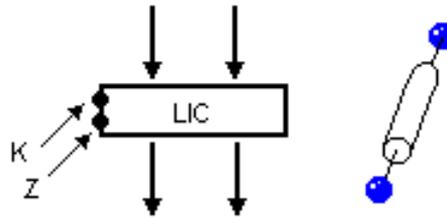


Figure 15 : Liaison conditionnelle et ces paramètres contrôlables : K=constante de raideur du ressort, Z=constante de frottement.

La *liaison conditionnelle* (voir Figure 15) est une liaison du type ressort-frottement recevant en entrée deux variables : la constante raideur K du ressort et la constante Z de frottement. Des conditions établies au préalable déterminent l'état de cette liaison conditionnelle en fonction des valeurs reçues en entrée. Il suffit donc, pour modifier la liaison, de modifier K et Z . Le cas le plus simple est l'annulation des variables qui permet de « couper » la liaison mais de manière générale, on affecte une valeur à K et Z parmi un ensemble prédéfini.

« La liste de conditions n'est pas limitée. Plusieurs conditions différentes peuvent faire passer dans un même état. Plusieurs conditions peuvent être vérifiées qui ne conduisent pas au même état ; dans ce cas, c'est la première rencontrée qui l'emporte. Enfin si aucune condition n'est vérifiée, il n'y a alors pas de changement d'état.²⁶ »

La base algorithmique du premier système CORDIS ANIMA implanté et utilisé pour la simulation depuis presque vingt ans est ainsi constituée de ces trois éléments : *masse ponctuelle*, *liaison ressort-frottement* et *liaison conditionnelle*. Elle est complétée par des modules constituant une variante de ces trois derniers et introduisant une certaine souplesse dans la simulation. Les premiers modules complémentaires sont les *modules dits « dégénérés »*. Ces modules incomplets servent une cause pratique. Par exemple, le module SOL reçoit une somme de forces en entrée (points M) pour ne fournir qu'une position obstinément fixe en sortie : il simule un point d'attache. Un autre type de module complémentaire est constitué par « *intégration* » de plusieurs modules élémentaires. En effet certaines structures, comme une corde par exemple, sont constituées d'une multiplicité d'éléments semblables. Il est alors inutile voire encombrant de disposer du

degré d'atomicité que nous fournissent les trois composants fondamentaux dans la mesure ou l'on peut regrouper les algorithmes définissant chaque atome en un seul, moins complexe, et plus économique.

Toute cette base algorithmique fait l'objet d'extensions, en effet, CORDIS ANIMA est conçu pour que des améliorations constantes, des compléments, puissent être ajoutés autour de cette base, afin de pouvoir obtenir n'importe quelle simulation souhaitée. Il va de soi que la variété et le nombre de ces extensions peuvent être infinis, pourtant nous tenterons de donner un léger aperçu des extensions les plus importantes.

3.1.4. Les extensions

La pratique a montré que des extensions des éléments décrits précédemment étaient nécessaires pour optimiser le principe d'économie. Ainsi la liaison conditionnelle donne naissance à *la liaison conditionnelle généralisée* qui permet de définir les états de la liaison non plus uniquement par les paramètres appliqués mais par des algorithmes spécifiques. Ces derniers restent compatibles avec la notion d'élément de liaison et le nombre d'états possibles reste faible (2 ou 3).

Les modules intégrés engendrent un deuxième type d'extension : les *modules à « grande intégration »*. Ceux-ci peuvent permettre de modéliser des éléments complexes mais homogènes d'un instrument de musique, comme par exemple une corde, un marteau ou une caisse de résonance qui ont la propriété d'être « le siège individuellement de phénomènes à variable d'état de grande dimensionnalité, mais qui sont liés entre eux par des connexions à faible dimensionnalité²⁸ ». Autrement dit, ces structures vibrantes sont composées d'un grand nombre d'éléments identiques communiquant avec leur environnement par un faible nombre de points. Parmi ces modules à grande intégration on peut citer par exemple « *la chambre modale* » ou « *l'agglomérat* ».

Les *modules « ad-hoc »* constituent le troisième type d'extension le plus courant. Celui-ci est un module dans lequel tout est permis du point de vue logarithmique avec néanmoins les restrictions suivantes : sa fonction doit rester mécanique, il doit

²⁸ C. Cadoz, J. L. Florens, A. Lucianni, « CORDIS-ANIMA : système de modélisation et de simulation d'instruments et d'objets physiques pour la création musicale et l'image animée » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, Paris, 1994, vol. II, p. 621.

correspondre à un modèle physique et présenter un certain nombre de point de communication et d'éventuels paramètres de contrôle. Ce module permet d'intégrer à CORDIS ANIMA des démarches de modélisation de différentes natures comme les modèles de Karplus / Strong ou les guides d'ondes de Julius Orion Smith. Il convient de ne pas confondre cette ouverture vers d'autres démarches avec les modules à grande intégration décrits précédemment, ni avec les modules extra-physiques que nous allons décrire maintenant.

Ces *modules extra-physiques* sont des modules pour lesquels on ne cherche aucune référence à des processus physiques réels.

« Les modules extra-physiques (...) doivent précisément permettre d'introduire dans le corps même de l'objet central, des processus (...) répondant d'une autre logique que celle de la mécanique, de l'instrumentalité physique du monde²⁸ ».

Toutes les extensions apportées à CORDIS ANIMA permettent d'ouvrir le système et de le développer. Néanmoins, ces modules en question sont bien délimités à l'intérieur du formalisme global de l'objet simulé.

« Cette attitude permet d'identifier rigoureusement l'emplacement des îlots non physiques et par la même, d'une part de circonscrire leurs effets indésirables, d'autre part d'exploiter leurs effets intéressants²⁸ ».

3.1.5. Contrôle des instruments simulés par des transducteurs gestuels rétroactifs

Un des enjeux essentiels de Cordis-Anima est de reconstituer le rapport existant entre l'instrument et l'instrumentiste. La communication instrumentale est visuelle, auditive et tactile, et seule l'union de ces trois canaux permet une bonne perception sonore. En effet, de nombreuses expériences psychoacoustiques mettent en évidence que la compréhension du son, dans certaines circonstances, n'est possible qu'avec la participation du visuel et du gestuel. Une approche uniquement acoustique du son ne peut-être complète, Cordis-Anima intègre donc le fonctionnement de la communication instrumentale (voir Figure 16) dans sa synthèse par modèles physiques.

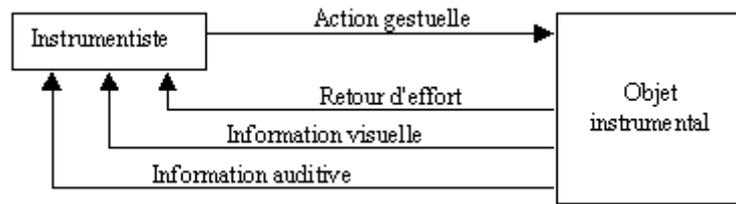


Figure 16 Schématisation d'une communication complète entre instrument et instrumentiste.

La réalisation d'un tel système nécessite la présence de trois interfaces. L'interface acoustique est, comme dans toute synthèse sonore, un complexe de haut-parleurs, sachant que de manière interne la structure vibrante est écoutée au moins en un point. L'interface visuelle est assurée par un écran sur lequel apparaissent les déformations de l'objet vibrant, manipulé par une interface gestuelle à retour d'effort. Cette interface est nommée *transducteur gestuel rétroactif* (TGR).

▪ **Exemple de deux prototypes de transducteurs gestuels rétroactifs.**

Le TGR permet à la fois de communiquer au modèle le geste de l'instrumentiste, et également de renvoyer à ce dernier la réponse mécanique de l'objet. Le TGR doit se manipuler d'une façon comparable à celle rencontrée dans le monde instrumental, tout geste appliqué devra donc correspondre à un résultat sonore directement et logiquement associé, et à une réaction d'ordre kinesthésique de la part de l'instrument. Si l'instrumentiste applique une force sur le TGR, celui-ci l'enverra à un module d'excitation greffé sur l'instrument qui transmettra l'excitation à la structure vibrante modélisée. Celle-ci, mise ainsi en vibration, renverra, suivant le chemin inverse parcouru par l'information de force, sa ou ses variations(s) de position à l'instrumentiste (voir Figure 17).

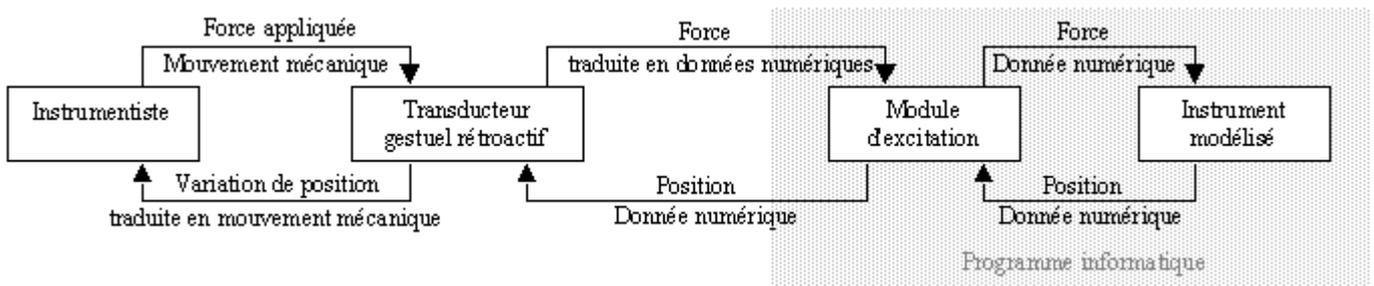


Figure 17 : Processus d'excitation avec rétroaction.

Sur ce principe, différents dispositifs ont été mis au point. Nous présenterons comme exemple, deux prototypes mis au point à l'ACROE. Le retour d'effort est ici limité à un degré de liberté.

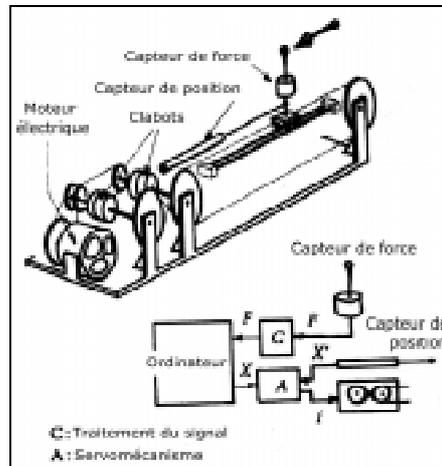


Figure 18 : Le transducteur gestuel conçu par J.L. Florens²⁹.

Le premier appareil, conçu par J. L. Florens, en 1978, consiste en une manette montée sur un support, coulissant le long de deux guides horizontaux (voir Figure 18). Deux capteurs de pression et de position enregistrent respectivement la pression exercée sur la manette par l'opérateur et le déplacement du support le long du rail. Le retour d'effort est provoqué par un dispositif constitué d'un moteur tournant en permanence et d'un système de clabots électrodynamiques commandés par ordinateur. Le modèle simulé répond à la force exercée par retour à sa position de départ. Pour toute force appliquée, le modèle informatique calcule la réponse. Celle-ci est transmise au transducteur qui la traduit en mouvement mécanique par l'intermédiaire d'un servomécanisme et la transmet à l'instrumentiste.

Le deuxième dispositif, conçu en 1980, consiste en une touche unique inspirée de celles d'un piano, mais avec un déplacement d'une latitude de cinq centimètres (voir Figure 19). Ce système est plus complexe que le premier et fonctionne tout à fait différemment. La vibration et le bruit dus à un moteur tournant constamment sont supprimés. Le temps de réponse est plus court et la précision des mouvements est de l'ordre d'une douzaine de microns. Cependant, la moindre puissance du moteur pose problème : un obstacle parfaitement rigide est très dur à simuler. Les forces appliquées peuvent devenir très

²⁹ Schémas extrait de C. Cadoz, J. L. Florens, A. Luciani, « Responsive input devices and sound synthesis by simulation of instrumental mechanisms : the Cordis system », *Computer Music Journal* vol.8 n°3, 1993, p. 63.

importantes en peu de temps, ce qui est difficile à modéliser sur un appareil léger et compact, limité mécaniquement. Ce prototype donnera néanmoins naissance à un clavier rétroactif breveté de 16 touches³⁰.

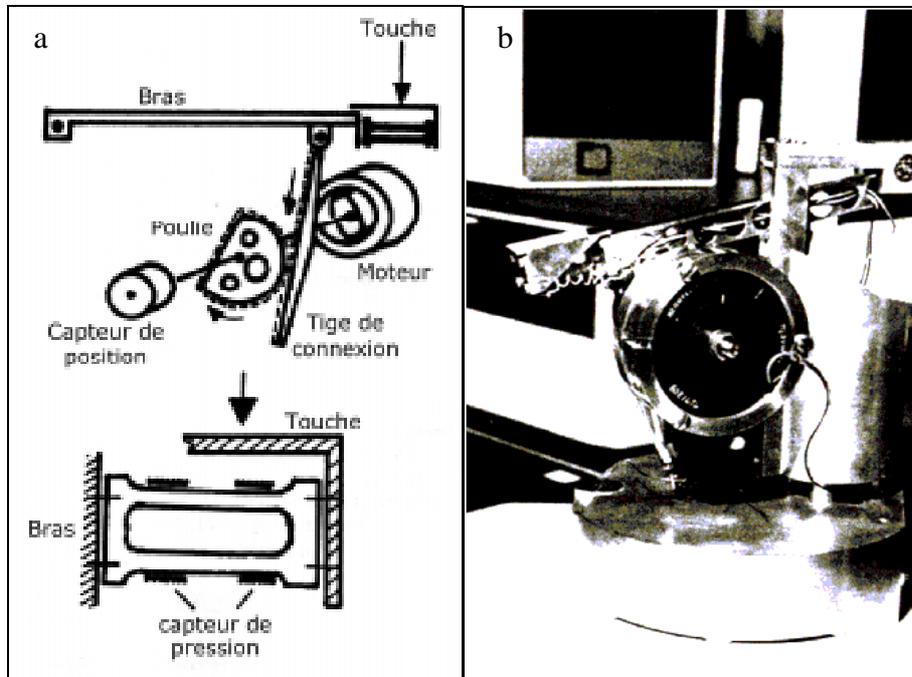


Figure 19 : Transducteur gestuel rétroactif sous forme de touche.

(a) Schéma du dispositif.

(b) Deuxième version construite en janvier 1981³¹.

▪ Représentation du geste et son traitement

Toute manipulation du transducteur gestuel est mémorisée sous forme de données numériques codée suivant une structuration spécifique. Ces données sont associées à des canaux gestuels différents correspondant aux différents capteurs. Le geste, pouvant ainsi être stocké sous sa représentation numérique, offre à l'instrumentiste deux possibilités de travail : soit conserver une approche purement immédiate en temps réel, soit faire appel, en temps différé, à un geste déjà mémorisé auquel cas, en vertu de sa forme purement

³⁰ C. Cadoz, J. L. Florens, L. Lisowski, « Clavier rétroactif modulaire et actionneur modulaire plat » 1998, Brevet d'invention français n°88 14064 et des mêmes auteurs « Modular Feedback Keyboard » dans *Proceedings of the International Computer Music Conference*, San Francisco, International Computer Music Association, 1990.

³¹ Schémas extrait de C. Cadoz, J. L. Florens, A. Luciani, « Responsive input devices and sound synthesis by simulation of instrumental mechanisms : the Cordis system », *Computer Music Journal* vol.8 n°3, 1993, p.63.

numérique, ce dernier pourra éventuellement avoir subi quelques traitements. Ainsi, une démarche d'action en temps différé peut s'établir et offre la possibilité d'introduire toutes formes de traitements allant de la simple modification à l'application de modèles algorithmiques plus complexes (voir Figure 20).

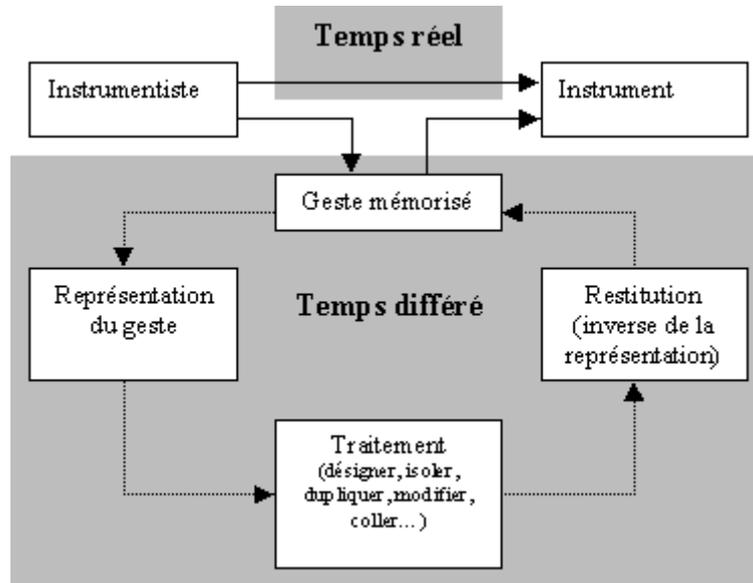


Figure 20 : Action de l'instrumentiste sur l'instrument, en temps réel ou temps différé, avec ou sans traitement du signal.

Suite à Cordis-Anima, nous allons examiner Mosaïc, autre technique de synthèse modale. Cordis-Anima est développé exclusivement à l'ACROE de Grenoble, alors que Mosaïc est développé par l'IRCAM à Paris. Cependant, les deux centres suivent de près leurs travaux respectifs, et si Cordis-Anima et Mosaïc diffèrent sensiblement malgré leur formalisme commun, la raison en est leurs objectifs distincts.

3.2. Mosaïc

Mosaïc³² est un logiciel de synthèse modale conçu à l'IRCAM par Jean-Marie Adrien et Joseph Morrison. Il comprend un noyau composé de fonctions permettant d'exécuter les algorithmes de synthèse physique. Ces algorithmes, écrits en C++, ont été développés par Jean-Marie Adrien sur une période de plusieurs années (voir § II.3). Mosaïc a été programmé en Scheme, dialecte du Lisp, et développé sur UNIX (Dec et NeXT) puis porté sur Macintosh. Le programme comprend également un interprète du Scheme qui sert à la fois d'interface interactive et de langage d'extension. Cet interprète est le langage ELK, conçu par Oliver Laumann à l'université technique de Berlin. Les algorithmes, les mécanismes de contrôle et l'interprète du Scheme ont été intégrés au programme par Joseph Morrison.

3.2.1. Présentation

Mosaïc³³ est une boîte à outils logicielle modulaire de synthèse modale qui se présente à l'utilisateur sous forme d'un établi virtuel sur lequel on place et assemble des objets en vue de créer des instruments. Ces objets sont de deux types ; il y a des *objets résonnants* (plaques, membranes, colonnes d'air, cordes, chevalets...) et des *objets excitateurs* (plectres, archets, marteaux...). Les caractéristiques de ces objets (taille, matériau...) sont précisées par l'utilisateur. Les interactions entre ces objets se font grâce à des *connections* représentées par des « boîtes noires » placées entre les objets. Elles peuvent être de différentes natures : collage, pincement, frottement, percussion, poussée... Ces *connections* se font à des points précis de l'objet dits *points d'accès*. Ces derniers peuvent se déplacer au cours de la simulation. Les différents paramètres de l'interaction, appelés *commandes*, peuvent être précisés. Par exemple, dans le cas du frottement d'un archet, on peut varier la vitesse de frottement, le taux de colophane, etc. Le son est généré en ordonnant au logiciel de simuler le déplacement des objets selon une trajectoire donnée, entraînant un choc, un frottement ou un autre type d'interaction avec d'autres objets. Les objets peuvent être également décrits et connectés entre eux grâce à l'interprète du langage

³² MOdal Synthesis and Analysis with Interpretative Control.

Scheme dont nous avons parlé précédemment. Autrement dit, cet interprète, qui est lui-même un langage, permet d'écrire un petit programme décrivant l'instrument et le mouvement des objets le constituant. Il suffit alors de lancer ce programme pour que Mosaïc simule le mouvement et nous donne le son résultant.

La particularité de Mosaïc réside dans sa modalité. La vibration de l'objet simulé est décomposée en modes qui correspondent aux diverses déformations périodiques et simultanées d'un corps. Chaque mode se caractérise par un partiel (harmonique ou non) et son temps d'extinction, et est associé à une fréquence de résonance qui le met en action suivant les différents points d'excitation.

Le son de sortie est obtenu en connectant des microphones virtuels à des *points d'accès* de l'objet. Pour obtenir un son plus réaliste et plus proche de ce que notre oreille peut entendre dans le monde acoustique, les équipes de l'IRCAM travaillent à la réalisation d'un logiciel de calcul du rayonnement du son, ce qui permettrait de placer les microphones non plus au contact de l'objet mais dans l'espace tridimensionnel. Les travaux récents ont permis, la création d'une interface graphique conviviale pour les musiciens appelée Modalyser, sous forme d'un établi entièrement graphique, plus instinctif et dispensant totalement d'apprendre le Scheme et d'utiliser ce langage pour programmer le modèle. L'implantation du programme en temps réel par l'intermédiaire du logiciel jMax³⁴ est encore à l'état expérimental. Des développements sont encore nécessaires pour améliorer le temps réel.

3.2.2. problèmes rencontrés

Les problèmes à résoudre sont les mêmes que pour n'importe quel autre outil de synthèse par modèles physiques : le programme doit être assez simple pour éviter les trop gros calculs, mais suffisamment complexe pour obtenir un son satisfaisant. De plus le programme se doit d'être flexible et facile à utiliser. Le premier problème est résolu par les

³³ Sur le disque d'exemples sonores sont proposées deux œuvres qui utilisent des sons réalisés avec Mosaïc, *Amers* de Kaija Saariaho (voir Annexe 2 § 3, CD1 Page 26) et *Dans la distance* de François Nicolas (voir Annexe 2 § 4, CD1 Page 27 : œuvre complète. CD1 Page 28 : partie électroacoustique).

³⁴ Max est un environnement de programmation graphique destiné à la construction rapide d'applications musicales interactives. Utilisé avec l'extension MSP de David Zicarelli, Max offre à l'utilisateur un environnement musical complet pour l'audio et le MIDI. Développée par l'Ircam et la société Opcode Systems qui en assure la distribution, la version Macintosh, vendue à plusieurs milliers d'exemplaires, s'est rapidement imposée pour le contrôle d'événements MIDI et à présent pour la programmation d'applications et d'installations multimédia.

algorithmes de Jean-Marie Adrien. Le principe de la représentation modale et le calcul pas à pas du modèle simulé permettent une obtention rapide des résultats, de plus, ils permettent de générer n'importe quel modèle aussi délirant soit-il. Le second problème ne se résout en revanche pas aussi facilement. En effet, lorsqu'on utilise Mosaïc, il faut créer l'instrument mais également en jouer, spécifier les gestes avec un haut niveau de détail. Hors, qui connaît la valeur physique de gestes que l'on réalise instinctivement ?

« What is the right lip pressure to apply to a reed in a clarinet ? Even more difficult, what is the lip pressure for an instrument that vaguely resembles a clarinet but that you have invented ? (Perhaps the instrument is 10 metres long and requires a super-human lip pressure !)³⁵ »

La mesure des valeurs physiques sur des instruments réels permet de résoudre ce problème mais encore faut-il savoir comment réaliser une phrase musicale. La quantité d'ordres nécessaires pour indiquer à Mosaïc comment jouer musicalement une phrase est énorme, de plus, la réaction de l'instrument dépend de l'action précédente à laquelle il a été soumis. Il est donc nécessaire de synchroniser les actions pour rendre la phrase musicale cohérente.

Il est évident que seul le créateur est à même de décider la façon dont l'instrument qu'il a créé doit être joué. Comme Adrien et Morrison le signalent avec humour, il peut décider que la façon normale de jouer de la guitare est de frapper le dos de la caisse avec des mailloches. Cependant, une bibliothèque de connaissances permettant de résoudre les problèmes acoustiques courants constituerait une aide non négligeable pour la simulation d'instruments inventés. Mosaïc est un programme ouvert dans le sens où cette bibliothèque peut être constituée au fur et à mesure, en isolant les programmes simulant une interaction satisfaisante musicalement et en les stockant séparément, dans le but de les réutiliser plus tard. De nouveaux objets résonnants ou excitateurs peuvent également être ajouté aisément

au programme. Des objets déjà complexes comme une touche de piano, par exemple, peuvent être stockés sous un nom donné, de manière à être réutilisés dans une machine encore plus complexe sans qu'il soit nécessaire de réécrire toute cette partie du programme.

3.2.3. Le langage Mosaïc

Mosaïc n'est pas seulement un outil de synthèse par modèles physiques, les enjeux réels de ce programme sont clairement décrits par j. D. Morrison et J.-M. Adrien.

« MOSAIC may be viewed as a "physical synthesis sound description language", in much the same way PostScript is considered a printed page description language. Though PostScript is itself a powerful programming language, it is rarely used for programming by human ; far more often it is used as an output language for drawing programs. Similarly, it is expected that in the future, users will rarely program directly in MOSAIC ; rather, they will use higher level interfaces that use MOSAIC as an output language³⁶. »

▪ Les objets

Il existe plusieurs méthodes pour obtenir les structures complexes chargées d'émettre des sons. Premièrement, il est possible d'utiliser les objets³⁷ proposés par Mosaïc pour construire un instrument simple et homogène. Ces objets sont les cordes, les barres,

³⁵ J.-M. Adrien et J. D. Morrison, « MOSAIC : A modular program for synthesis by modal superposition » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, Paris, 1994, vol. II, p. 375.

Je traduis : « Quelle est la pression de l'air au niveau des lèvres appliquée à l'anche d'une clarinette ? Plus difficile encore, quelle est la pression de l'air au niveau des lèvres pour un instrument qui ressemble vaguement à une clarinette mais que vous avez inventé ? (peut-être que cet instrument mesure 10 mètres de long et qu'il nécessite une pression d'air surhumaine). »

³⁶ J.-M. Adrien et J. D. Morrison, *op. cit.*, vol. II, p. 376.

Je traduis : « MOSAIC peut être considéré comme un "langage de description des sons par synthèse physique", de la même façon que PostScript est considéré comme un langage de description des pages imprimées. Bien que PostScript soit lui-même un puissant langage de programmation, il est rarement utilisé par des humains pour programmer ; le plus souvent il est utilisé comme langage de sortie pour des programmes de dessin. De même, il est probable qu'à l'avenir, les utilisateurs programmeront rarement directement en MOSAIC ; ils utiliseront plutôt des interfaces de plus haut niveau dont le langage de sortie sera MOSAIC. »

³⁷ Ces objets sont définis grâce à des algorithmes pré-programmés.

les modèles à une masse ou deux masses, les tubes (fermés à un ou aux deux bouts), les membranes circulaires ou rectangulaires (d'épaisseur nulle), les plaques circulaires ou rectangulaires (d'épaisseur non-nulle) libres ou fixes, et les chevalets de violon ou de violoncelle. Pour chacun de ces objets il est nécessaire de spécifier les paramètres comme la longueur, l'élasticité, la matière, etc.

Voici par exemple les lignes du programme permettant de créer une corde³⁸ :

<code>(define my-string</code>	→je définis la chose appelée « my-string »
<code>(make-object 'bi-string</code>	→j'en fais un objet de type corde
<code>(mode 40)</code>	→je définis ses paramètres : mode vibratoire,
<code>(length .5)</code>	longueur, tension, densité, rayon (à la section)
<code>(tension 150)</code>	
<code>(density 1000)</code>	
<code>(radius .001)))</code>	

La deuxième solution est d'obtenir la structure par une méthode extérieure à Mosaïc : par une analyse expérimentale, par une analyse informatique d'éléments finis ou toute autre technique.

La troisième et dernière façon d'obtenir l'instrument de musique souhaité est de créer un hybride entre deux structures déjà existantes. Il existe deux types hybridation : le *fondu* (melt) ou le *mélangé*³⁹ (mix). Dans l'hybride final, La proportion de chaque structure peut-être variée dynamiquement. Dans un hybride fondu, les caractéristiques des deux instruments sont intimement mêlées, les deux instruments ne forment plus qu'un. Si par exemple on hybride de cette manière une corde longue et une corde courte, l'hybride, une fois excité, produira un son plus aigu ou plus grave selon la proportion de chaque structure présente dans celui-ci. En revanche, l'hybride mélangé se contante de « coller » ensemble les deux objets. L'hybridation des deux cordes aboutirait dans ce cas à un instrument laissant entendre les deux sons des deux cordes. La puissance respective du son de chaque corde dépendra de la proportion de chacune d'elles dans l'hybride.

³⁸ J.-M. ADRIEN et J. D. Morrison, « MOSAIC : a framework for modal synthesis » dans *Computer Music Journal* v.17 n°1, 1993, p. 47.

³⁹ Le « mix » est normalement traduit par « glissé », malheureusement ce terme ne rend pas du tout compte de la nature de ce type d'hybridation, je lui est donc préféré la traduction littérale de « mix » qui est « mélangé ».

▪ Connexions : actions et interactions

Mosaic propose un certain nombre d'interactions (pré-programmées) possibles entre les objets. Par exemple, on peut choisir d'établir une interaction du type « frappement » entre une barre de bois et une plaque de métal. Pour faire interagir deux objets, il est nécessaire de choisir un point d'accès sur chacun d'eux, c'est à dire : le point qui doit rentrer en contact avec l'autre objet. L'interaction se place alors entre ces deux points d'accès comme une boîte noire indiquant une relation entre eux (voir Figure 21).

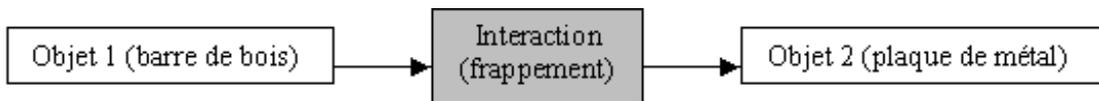


Figure 21 : Modèle d'interaction entre deux objets.

Collage (adhere) : Cette action permet de coller le point d'accès d'un objet à celui d'un autre objet. Elle est utilisée pour assembler les différentes parties d'un instrument. Dans cet exemple, deux cordes sont « collées » par l'intermédiaire de deux points d'accès⁴⁰ :

```

(define acc1(make-acces string1 (const .6) trans0))
      →je définis la chose appelée « acc1 », j'en fais un point d'accès placé sur
      l'objet « string1 » que j'ai défini au préalable

(define acc2(make-acces string2 (const .4) trans0))
      →je définis la chose appelée « acc2 », j'en fais un point d'accès
      placé sur l'objet « string2 » que j'ai défini au préalable

(make-connection `adhere acc1 acc2)
      →je crée une connexion de type collage entre les deux points
      d'accès « acc1 » et « acc2 »
  
```

Frottement (bow) : Cette fonction n'exécute pas directement un frottement entre deux objets. Les points d'accès des deux objets sont en contact et c'est seulement lorsqu'un mouvement est appliqué à l'un des deux objets que le frottement a lieu.

⁴⁰ J.-M. Adrien et J. D. Morrison, « MOSAIC : a framework for modal synthesis » dans *Computer Music Journal* v.17 n°1, 1993, p. 48.

Pincement (pluck) : Une fois encore le pincement n'a lieu que si l'un des objets est mis en mouvement. Le point d'accès de l'objet pinceur « agrippe » le point d'accès de l'objet pincé mais lorsque les objets sont éloignés l'un de l'autre, un maximum de tension (défini par l'utilisateur) est atteint et la connexion entre les deux point d'accès est rompue : le pincement à lieu.

Anche simple (simple reed) : Cette interaction à été spécialement créée pour faciliter la conception d'instruments à anche. Un des points d'accès est considéré comme un point d'une anche et l'autre comme un point d'un tube acoustique. De nombreux paramètres permettent de définir les flux d'airs. Il faut remarquer que cette interaction fonctionne également avec n'importe quels autres objets, cependant le son obtenu n'est pas le son typique d'un instrument à anche.

Frappement (strike) : Dans le cas où un mouvement est imprimé à l'un des objets, un frappement à lieu entre eux. Il est possible d'effectuer toute une série d'interactions de frappement entre deux objets dans le but de simuler leur proximité et l'éventualité d'un contact entre eux.

Etranglement ou Touche (neck or fingerboard) : Cette connexion est conçue tout spécialement pour simuler la présence d'une touche sur un instrument à cordes comme le violon. Un objet est utilisé pour pincer la corde, leur points d'accès sont en contact, et la présence simulée de la touche, permet de bloquer la corde afin de diminuer sa longueur vibrante. Si cette « touche » virtuelle était absente, on obtiendrait le même effet qu'en posant le doigt sur la corde d'un violon sans la plaquer contre la touche.

Il est intéressant de remarquer que la définition de ces interactions ne tient pas compte de la nature des objets qui interagissent entre eux. Ceci est particulièrement visible dans les lignes de programmes illustrant la fonction collage (adhere). Cela implique que n'importe quels objets peuvent interagir entre eux : un tube peut servir d'archet à une corde, un corps de violon peut servir d'anche à un tube, etc. Ce genre de combinaison produit des sons bizarres mais reste physiquement cohérent.

En complément de ces fonctions définissant des interactions, il existe des actions simples applicables aux objets par l'intermédiaire d'un seul point d'accès (voir Figure 22).

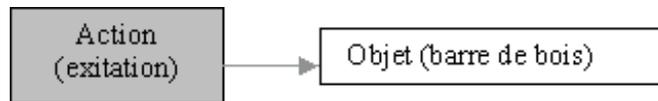


Figure 22 : Exemple d'action sur un objet : une poussée est appliquée à la barre de bois.

Trou (tube hole) : Cette action n'est utilisable que sur un tube et simule l'ouverture d'un trou dans ce dernier.

Excitation (force) : Cette action permet d'appliquer une force sur un point d'accès avec une orientation donnée dans le but par exemple de mettre en mouvement un archet qui doit frotter une corde (voir fig.10).

Vélocité (velocity) : Cette fonction limite la vélocité en un point d'accès donné.

Position : Cette fonction limite le mouvement d'un point d'accès donné.

Enfin, ces trois dernières connexions offrent des compléments utiles :

Micro (pick up) : La variation de la pression acoustique au point d'accès choisi est envoyée dans un fichier de son (enregistrement qui peut ensuite être écouté). Voici les lignes du programme permettant de créer une membrane, un point d'accès sur cette membrane et un micro relié à ce point d'accès⁴¹ :

⁴¹ J.-M. Adrien et J. D. Morrison, « MOSAIC : A modular program for synthesis by modal superposition » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, Paris, 1994, vol. II, p. 384.

```
(define membrane (make-object `rect-membrane `() 24 .6 .4 111 .1 .5 .5))
    →je définis la chose appelée « membrane », j'en fais un
    objet du type membrane-rectangulaire et je définis ses paramètres

(define membrane-listen-point (make-access membrane (const .7 .4)))
    →je définis la chose appelée « membrane-listen-point »,
    j'en fais un point d'accès sur la membrane et je définis ses
    caractéristiques

(make-output membrane-listen-point `x)
    →je crée un micro connecté au point d'accès
    « membrane-listen-point »
```

Mode mix : Cette fonction permet d'envoyer la combinaison des différents modes vibratoires d'une structure dans un fichier de son.

Dopage (dope) : Cette connexion permet d'ajouter une excitation extérieure (signal audio) à la vibration d'une structure spécifique, durant la simulation. Il est par exemple possible d'exciter un gong avec la vibration d'une voix parlée.

▪ Les contrôleurs

Les *contrôleurs* sont des fonctions utilisées pour spécifier les valeurs qui sont susceptibles de varier dans le temps. Il ne faut en aucun cas les confondre avec les paramètres associés à chaque objet, dont le rôle est de définir leurs caractéristiques (longueur, densité...). Pour comprendre le rôle de ces contrôleurs il suffit d'imaginer que la machine simulée par Mosaïc est une boîte noire sur laquelle se situent des boutons, un pour chaque contrôleur. Les boutons correspondant à des contrôleurs constants sont collés à leur place et ne peuvent pas être bougés. Les boutons correspondants à des contrôleurs d'enveloppe suivent cette enveloppe dès que la machine est mise en marche.

Ces contrôleurs n'ont pas uniquement pour rôle de transmettre des valeurs, mais peuvent également en recevoir : ils possèdent une sortie et peuvent avoir une ou plusieurs entrées. Ceci permet de créer de véritables réseaux de contrôleurs, et de produire un système de synthèse FM⁴² ou de synthèse additive⁴³.

⁴² Synthèse par Modulation de Fréquence : une fréquence fixe dite porteuse est variée (modulée) par une fréquence modulante. Ce principe est utilisé pour transmettre les ondes radio.

Mosaïc propose plusieurs contrôleurs pré-programmés qui apportent une flexibilité supplémentaire au système :

Constant : Ce contrôleur génère une valeur constante ce qui est pratique lorsque l'utilisateur doit obligatoirement utiliser un contrôleur mais qu'il ne désire pas faire varier la valeur.

Enveloppe (Breackpoint enveloppe) : la valeur de sortie de ce contrôleur suit une enveloppe indiquant la valeur limite acceptable.

Générateur de fréquence (Sine generator) : Ce contrôleur délivre une onde sinusoïdale dont la fréquence doit être spécifiée par un autre contrôleur branché en entrée.

Fichier MIDI (MIDIfile) : Ce contrôleur permet d'utiliser des fichiers MIDI comme source de données. Il extrait les valeurs intéressantes et les transmet en sortie.

Dernier échantillon (Last sample) : Ce contrôleur permet de réutiliser le dernier échantillon de son produit par la machine simulée, dans le but par exemple, de créer une rétroaction.

Echelle (Scale) : Ce contrôleur permet d'effectuer un changement d'échelle. En entrée, il reçoit les valeurs d'un autre contrôleur (entre 1 et 100, par exemple) et les met à l'échelle souhaitée (entre 1 et 20, par exemple) avant de les communiquer en sortie.

Dynamique (Dynamic) : Les contrôleurs dynamiques sont similaires aux contrôleurs constants, mais ils ont la particularité de pouvoir être contrôlés en cours de simulation. Dans le programme lui-même on peut insérer des lignes de commande pour changer la valeur de ce contrôleur. Les valeurs correspondant à l'analyse d'une exécution instrumentale réelle peuvent être envoyées à de nombreux contrôleurs dynamiques qui contrôleront le jeu de l'instrument virtuel simulé.

Universel (Universal) : Ces contrôleurs universels peuvent être programmés à volonté par l'utilisateur Ils peuvent contenir des fonctions arbitraires en Scheme mais ils ne doivent pas être utilisés en trop grand nombre car ils ralentissent la synthèse du son.

Toutes ces actions, interactions et contrôleurs, sont présents dans Modalys sans grandes modifications. Modalys présente en revanche plusieurs améliorations que nous

⁴³ La synthèse additive permet de reconstituer un son complexe (possédant une fondamentale et des harmoniques) en additionnant des sinusoides simples.

allons détailler maintenant. Nous évoquerons également Modalys-ER, l'interface graphique développée pour Modalys.

3.2.4. Modalys / Modalys-ER

Modalys⁴⁴ est, comme nous l'avons dit précédemment, le successeur de Mosaïc. Les travaux de recherche et le développement du système ont été repris à l'IRCAM en 1994 par l'Equipe de Recherche en Acoustique Instrumentale dirigée par René Caussé et l'équipe de développement des interfaces et de la représentation du son dirigée par Gerhard Eckel. La nouvelle version du programme, renommée Modalys pour éviter toute confusion avec le navigateur Internet nommé Mosaïc, a été portée sur de nombreuses plates-formes informatiques et est désormais disponible sur DECStation, DECAAlpha, NeXT, SGI, Macintosh et PowerMacintosh. Comme la première version du programme supportait mal les accès directs aux données modales, la nouvelle version comprend une palette de modules de contrôle pour la manipulation de données modales statiques ou dynamiques. Ce système permet au compositeur de contrôler avec finesse les données modales, en accord avec ses besoins. Aujourd'hui Modalys s'est associé avec le programme Modalyser, interface graphique conviviale, mise au point à l'Université du Hertfordshire en Grande-Bretagne, et porte le nom de Modalys-ER.

Les travaux en cours s'orientent vers l'implantation de Modalys en temps réel. Un accès totalement en temps réel faciliterait le contrôle du modèle car il deviendrait possible de modifier les paramètres en cours d'écoute du son, grâce à des manettes, pédales d'effets, claviers, contrôleurs de souffle, etc. La version disponible en temps réel sur jMax et Max/MSP pose encore de nombreux problèmes. Le procédé est très coûteux en temps de calcul, seules des structures très simples peuvent être simulées et le nombre de modes (d'harmoniques) calculés pour chaque son doit être très réduit. Les optimisations en cours portent donc sur la vitesse de calcul qui permettrait d'augmenter le nombre de structures simultanées simulées et le nombre de modes pour chaque son. La solution pourrait venir de l'utilisation de la technique « multi-threading ». Cette méthode consiste à utiliser plusieurs processeurs (au moins deux) qui se partagent les tâches. Un des processeurs calcule le modèle à part, et quand il a fini, communique ses données au deuxième processeur qui met

la nouvelle configuration en service. Ce procédé permet d'éviter les « clics », ainsi que le retard dans le calcul des échantillons de son.

Lors des journées d'informatique musicale du forum de l'Ircam qui se sont déroulées du 8 au 10 mars 2000, il a été possible d'assister à la simulation en tant réel d'une corde excitée tantôt par une masse et tantôt par le son d'une voix captée par un micro. Le dispositif tournait sur un Pentium II à 450 MHz. En demandant à la machine de calculer 20 modes avec deux excitateurs (la masse et la voix), 30% de la capacité de calcul de la machine étaient utilisés. L'augmentation du nombre de modes ou le déplacement de l'excitateur augmentait considérablement ce pourcentage. Aucune simulation d'hybride entre deux structures n'était possible. Autre élément curieux : un déplacement de la masse au contact de la corde donnait un son granuleux comme si la corde avait été striée. Ceci est dû à la discrétisation de la corde.

Un éditeur en trois dimensions basé sur le langage Java est en cours de création, à l'université du Hertfordshire.

Les deux grandes techniques à vocation musicale, Cordis et Modalys, que nous venons d'évoquer, ne sont pas les seules à avoir fait l'objet de compositions musicales. La synthèse par guide d'ondes, qui s'appuie sur un formalisme totalement différent, a, elle aussi, su séduire les compositeurs, et ceci en raison son caractère économique en puissance machine et en temps de calcul.

⁴⁴ Sur le disque d'exemples sonores sont proposées des sons réalisés avec Modalys (CD1 Plage 2 à CD1 Plage 25), ainsi que deux œuvres qui utilisent ce programme, *L'Ivresse est un Nombre* (voir Annexe 2 § 5.1, CD2 page 1) et *Fleurs et Insectes* (voir Annexe 2 § 5.2, CD2 page 2) de Guillaume Loizillon.

4. La synthèse par guides d'ondes

La synthèse par guides d'ondes⁴⁵, fondée uniquement sur des techniques de traitement de signal, trouve son origine dans la découverte dans les années 80, par Kevin Karplus et Alex Strong, d'un algorithme très économique en calculs permettant d'obtenir un résultat sonore de corde pincée très convaincant. Celui-ci revêt une importance historique car c'est le premier exemple d'un nouveau type de synthèse physique. En ce sens, il constitue le pôle représentatif de tout un type de modélisation en plein essor aujourd'hui. Les musiciens et expérimentateurs, n'ayant pas accès aux puissantes machines capables de mettre en œuvre les outils de synthèse digitale, ont tout de suite apprécié la simplicité de l'algorithme de Karplus et Strong ainsi que la possibilité de l'utiliser sur des ordinateurs de faible capacité. Après de nombreuses améliorations et diverses extensions de ce modèle, réalisées par Julius O. Smith au CCRMA⁴⁶ de l'université de Stanford et par David Jaffe, la méthode de synthèse dite par guides d'ondes fut développée. L'implantation du système en temps réel fut réalisée pour les processeurs Intel 8080A (par Alex Strong), l'instrument Texas TMS9900 (par Kevin Karplus) et le SC / MP (par Mike Plass).

Premièrement, dans l'ordre chronologique, nous découvrirons le modèle de Karplus/ Strong qui constitue le point de départ de toute cette lignée de techniques de synthèse. Nous verrons ensuite de manière générale comment il sera enrichi jusqu'à donner naissance à la synthèse par guides d'ondes proprement dite.

4.1. Le modèle de Karplus / Strong

Le modèle développé par Kevin Karplus et Alex Strong a été plus le fruit d'un hasard que d'un désir intentionnel de la mise en place d'une synthèse par modèles physiques. En effet, au cours d'une synthèse avec table d'onde dont le contenu était du bruit blanc⁴⁷, Karplus et Strong ont découvert que lorsque le contenu de la table d'onde est filtré

⁴⁵ Sur le disque d'exemples sonores sont proposées quatre œuvres de David Jaffe utilisant la synthèse par guides d'onde, *May all your children be acrobats* (voir Annexe 2 § 8.1, CD2 page 31), *Telegram to the president* (voir Annexe 2 § 8.2, CD2 page 32), *Silicon Valley Breakdown* (voir Annexe 2 § 8.3, CD2 page 33) et *Grass* (voir Annexe 2 § 8.4, CD2 page 34), ainsi que des sons réalisés par des synthétiseurs commerciaux utilisant les guides d'ondes, le VL1 (voir Annexe 2 § 6, CD2 page 3 à CD2 page 20) et le VG-8 (voir Annexe 2 § 7, CD2 page 21 à CD2 page 30).

⁴⁶ Center for Computer Research in Music and Acoustics.

⁴⁷ Bruit homogène contenant toute les fréquences à intensité égale.

à chaque instant, il en résulte un timbre de corde pincée. Ils mirent ainsi au point un algorithme simulant les cordes pincées connu maintenant sous le nom de « Modèle de Karplus / Strong ».

Malgré la simplicité de la technique, le résultat sonore est extrêmement réaliste. Karplus et Strong⁴⁸ racontent que quand leur technique de synthèse a été comparée à la synthèse additive aux laboratoires Bell, ils ont réalisé qu'elle utilisait autant de puissance qu'une synthèse additive avec deux oscillateurs sinusoïdaux, alors que 30 oscillateurs sont nécessaires pour obtenir un son aussi satisfaisant. Elle n'offre pas la souplesse des techniques de synthèse digitale mais elle est en revanche économique, agréable à entendre et facile à contrôler. Les paramètres contrôlables de cette synthèse sont la hauteur, l'amplitude et le temps d'amortissement du son. La hauteur est approximativement définie par la période de l'onde en échantillons (paramètre p), l'amplitude est définie par l'amplitude maximale de départ A , et le temps d'amortissement est déterminé par la hauteur et un coefficient d'amortissement S .

Pour mieux comprendre comment fonctionne cette synthèse nous commencerons par décrire le principe des tables d'ondes qui est à l'origine de la découverte de Karplus et Strong.

4.1.1. Le principe des tables d'ondes

La table d'onde est la base du système de Karplus et Strong. La table d'onde est une mémoire permettant de stocker des échantillons de son. Pour pouvoir reproduire une période de l'onde sonore, on stocke p échantillons. Y_t est la valeur de l'échantillon à l'instant t (c'est à dire, l'échantillon portant le numéro t). Dans ce cas, si la table contient 4 échantillons ($p=4$) alors Y_1 est égal à Y_5 car une fois que les quatre échantillons sont lus, on retourne au premier. Ceci peut se traduire par l'algorithme :

$$Y_t = Y_{t-p}$$

La technique de la table d'onde est très simple, elle consiste à répéter indéfiniment les mêmes échantillons en boucle. L'inconvénient, c'est que le son est très monotone, il est

donc nécessaire de faire intervenir des irrégularités, des modifications, qui rendront le son vivant. L'algorithme de Karplus et Strong ne modifie pas les sons sortant de la table d'onde mais la table d'onde elle-même. Pour que le son reste périodique, autrement dit, pour qu'il garde une hauteur donnée et un timbre relativement homogène, les changements effectués doivent être très légers. Afin de ne pas mettre en péril l'économie du système, il ne faut changer qu'un échantillon en entrée pour chaque échantillon sorti. Si l'on remplace chaque échantillon que l'on vient de lire par une nouvelle valeur, on peut réduire la table d'onde à une période de l'onde, c'est à dire que la table ne contient que p échantillons, on appelle cela une ligne de retard de longueur p (voir Figure 23).

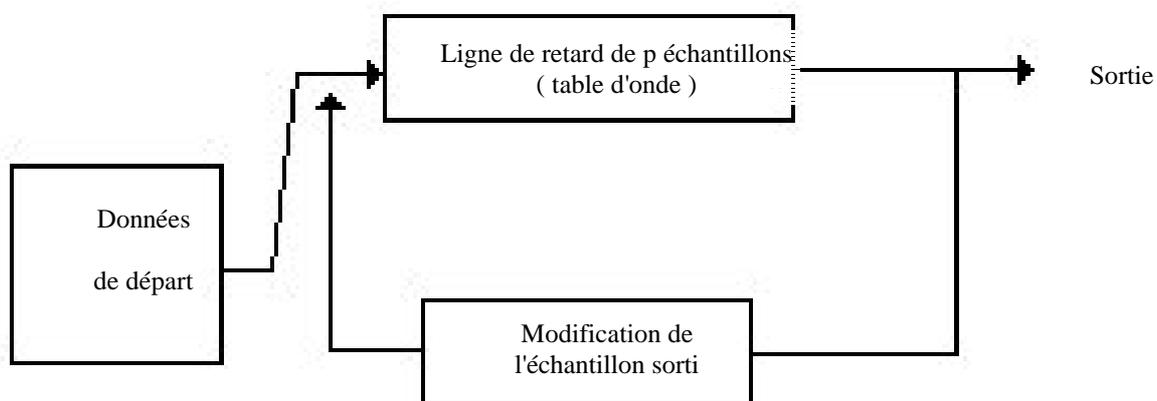


Figure 23 : Représentation schématique d'une table d'onde réduite à une ligne de retard modifiée au fur et à mesure de sa lecture.

4.1.2. L'algorithme de Strong

Cette modification, nécessaire pour rendre le son vivant, c'est Alex Strong qui en a eu l'idée en décembre 1978 : il s'agit de faire la moyenne de deux échantillons successifs (voir Figure 24), ce qui produit un amortissement progressif du son. Mathématiquement, cette idée se résume ainsi :

$$Y_t = \frac{1}{2} (Y_{t-p} + Y_{t-p-1})$$

Le son ainsi produit a une hauteur correspondant à une période de $p + \frac{1}{2}$ échantillons et ressemble au son d'une corde pincée. Aucune multiplication n'est nécessaire pour cette formule (juste une addition et une division), c'est ce qui rend les calculs si

⁴⁸ K. Karplus et A. Strong, « digital synthesis of plucked-string and drum timbres », *Computer Music Journal*

rapides et le système si économique. Une caractéristique très intéressante de cette formule est que les harmoniques du son ainsi produit ne sont pas amortis avec la même rapidité : les harmoniques aigus disparaissent plus rapidement, comme dans un son acoustique de corde pincée. Si la table d'onde reste la même entre deux notes l'effet obtenu est celui d'une liaison. Si p ne change pas, la note continue, et si p change, on obtient une liaison entre deux notes.

Pour que le son ressemble vraiment à celui d'une corde pincée, il faut que la période initiale du son soit riche en harmoniques. C'est dans ce but que la table d'onde est remplie de valeurs tirées au hasard au début de chaque note, ce principe permet de modifier la structure harmonique à chaque nouvelle note. Ce principe crée une variation suffisamment fine pour que les sons semblent tous provenir d'un même instrument mais permet d'éviter au son un aspect mécanique. De plus, ces valeurs constituent un bruit qui rappelle le pincement caractéristique de la corde.

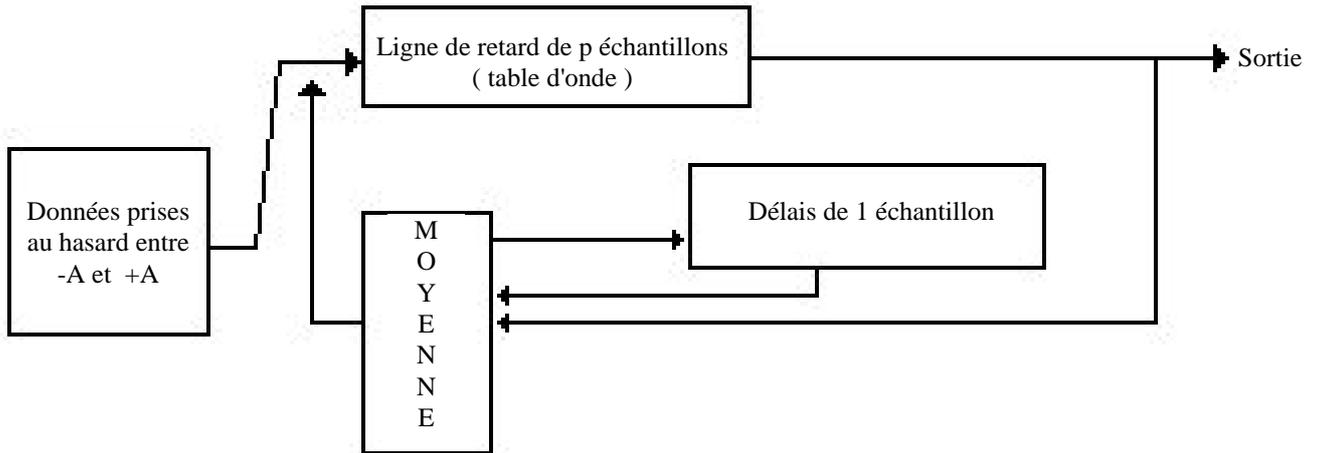


Figure 24 : Représentation schématique de la synthèse d'une corde pincée.

Pour fournir ces valeurs tirées au hasard qui doivent remplir la table d'onde on utilise la formule suivante qui permet de donner la valeur $+A$ ou $-A$ à l'échantillon Y_t , c'est à dire uniquement une valeur extrême ce qui permet de garantir au son résultant un grand nombre d'harmoniques (voir Figure 24) :

$$Y_t = \begin{cases} +A & \text{probabilité } 1/2 \\ -A & \text{probabilité } 1/2 \end{cases} \quad \text{Pour } -p \leq t \leq 0$$

Un problème survient dans cette synthèse si on désire obtenir des sons très aigus, la période p est alors très petite et le remplissage au hasard de la table, ainsi que les modifications survenant à chaque période, rendent le timbre totalement irrégulier et la hauteur incontrôlable. Après expérimentation, il a été conclu que p ne doit pas être inférieur à 32. Si on veut des sons plus aigus, il est donc nécessaire de changer la fréquence d'échantillonnage.

4.1.3. L'apport de Karplus

En décembre 1979, Karplus a découvert qu'une simple modification de l'algorithme de Strong permettait d'obtenir toute une gamme de sons allant des percussions aux cordes pincées. Cette modification consiste en l'introduction d'une formule de probabilité. La valeur d'un échantillon n'est plus, alors, systématiquement égale à la moyenne des deux échantillons précédents, mais elle est tantôt égale à cette moyenne, tantôt égale à son inverse. Ce qui se traduit par la formule suivante :

$$Y_t = \begin{cases} + \frac{1}{2} (Y_{t-p} + Y_{t-p-1}) & \text{probabilité } b \\ - \frac{1}{2} (Y_{t-p} + Y_{t-p-1}) & \text{probabilité } 1 - b \end{cases}$$

Le facteur b est nommé « blend factor⁴⁹ », c'est lui qui détermine avec quelle probabilité Y_t est égal à la moyenne des deux échantillons précédents ou à son inverse. Si $b=1$ la formule ajoutée par Karplus s'annule et le son est celui d'une corde pincée. Si $b=0$ le signal devient nul tous les $p + \frac{1}{2}$ échantillons alors le son passe à l'octave supérieure et prend un timbre qui évoque une corde pincée dans une bouteille dans l'aigu, et une harpe dans le grave.

Si $b=\frac{1}{2}$ le son est celui d'une percussion. Quand b prend une valeur intermédiaire, le son est un mélange de percussion et de corde pincée. Pour les sons de percussions, la période p ne contrôle plus la hauteur mais elle est proportionnelle au temps d'amortissement. Dans ce cas, p influence directement le timbre et permet d'obtenir divers types de percussions (voir Figure 25).

⁴⁹ Traduit littéralement : « facteur de fusion ».

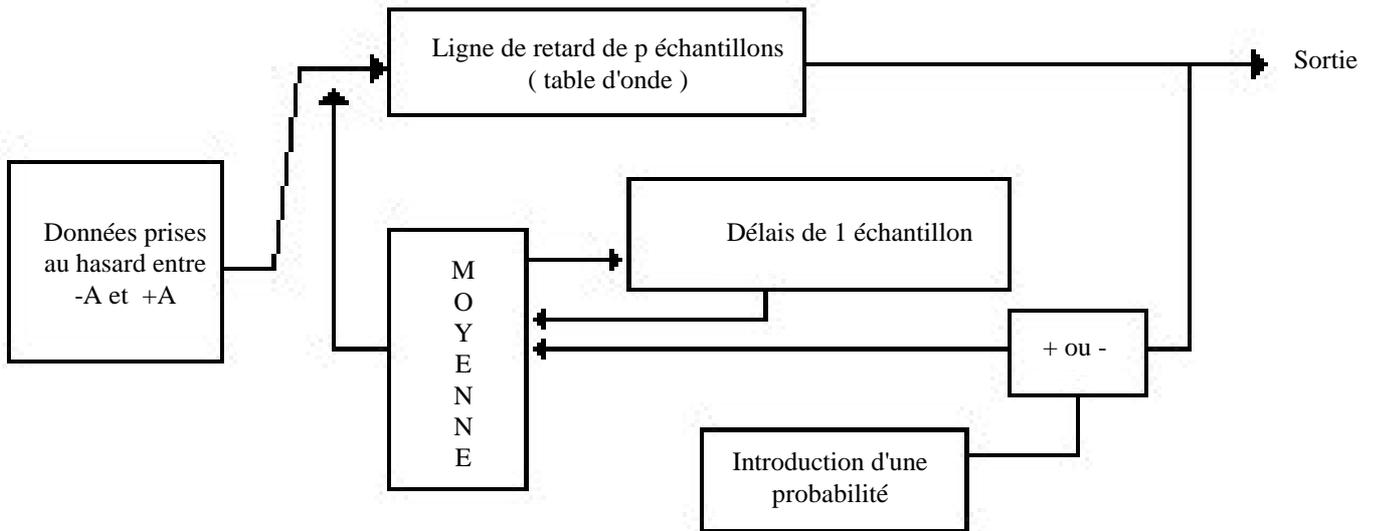


Figure 25 : Représentation schématique de la synthèse d'une percussion.

Comme la période p est proportionnelle au temps d'amortissement du son, pour une hauteur donnée, la durée du son est toujours la même. Si on veut obtenir un son plus long, il est donc nécessaire d'apporter encore une autre modification à l'algorithme. Ce qui détermine la hauteur et le timbre du son, c'est sa composition en harmoniques. Si on double la taille de la table d'onde alors le son aura une période double donc sera une octave plus bas ; mais si la première moitié de la table est identique à la seconde, alors seulement certains harmoniques seront présents et le son sonnera une octave plus haut que ce que la période p nous laissait présager. Pour appliquer cette idée, il suffit de modifier légèrement la formule qui permet de calculer le son. Au lieu de faire la moyenne des deux échantillons précédents pour obtenir un nouvel échantillon, de temps en temps il suffira de copier à l'identique l'échantillon précédent dans le but de rallonger le son. Ceci se traduit ainsi mathématiquement avec le facteur d'allongement du son désigné par S :

$$Y_t = \begin{cases} Y_{t-p} & \text{probabilité } 1 - 1/S \\ + 1/2 (Y_{t-p} + Y_{t-p-1}) & \text{probabilité } 1/S \end{cases}$$

Nous devons remarquer que S influence néanmoins légèrement la hauteur du son car la période du son n'est plus égale à $p + 1/2$ mais à $p + 1/S$. Ce n'est finalement pas un inconvénient puisque cela permet de régler les problèmes d'accords. En effet, puisque la période du son n'est pas tout à fait égale à p , il est difficile d'obtenir des intervalles

vraiment justes, mais par un choix astucieux de la valeur de S, il est possible de corriger ce problème. En utilisant une valeur élevée pour S (un son très long) avec une table d'onde non remplie au hasard, il est possible d'obtenir des sons de bois. Néanmoins l'attaque reste sèche comme pour une corde pincée et des recherches sont en cours pour améliorer ces sons.

Pour repousser les limites de cette synthèse, Karplus et Strong ont eu recours à des solutions astucieuses mais qui ne peuvent être générales. Ainsi de nombreux développements et améliorations ont été apportées par d'autres chercheurs.

4.2. Extensions de Jaffe et Smith

Afin d'augmenter la qualité des sons produits, Jaffe⁵⁰ et Smith ont apporté des améliorations à l'algorithme de Karplus et Strong.

Ils ont d'abord résolu le problème de la justesse des notes. En effet, l'algorithme de Karplus et Strong induisait une quantification des fréquences. L'écart, en fréquence entre deux notes graves successives est assez large pour que la quantification ne soit pas gênante, mais cet écart entre deux notes aiguës successives est plutôt mince, ce qui rend l'accord très difficile. L'introduction d'un filtre a permis de corriger ce problème. Ils ont cependant remarqué que pour obtenir un bon accord interne du son (accord des harmoniques), les octaves extrêmes doivent être élargies comme pour l'accord d'un piano.

Jaffe et Smith se sont également intéressés au problème de la dynamique du son. La modification de l'amplitude de départ du signal produit un effet d'éloignement ou de rapprochement du son. Pour donner la sensation d'une attaque plus forte, d'un son fortissimo, il est nécessaire d'agir sur le spectre en modifiant l'amplitude relative des harmoniques. Ils ont donc ajouté encore un filtre supplémentaire pour rendre possible les changements de dynamique du son.

Voici, tous les autres problèmes que Jaffe et Smith se sont efforcés de résoudre par l'ajout de filtres et de paramètres permettant de contrôler la synthèse :

⁵⁰ David Jaffe a développé la technique des guides d'ondes mais il est également compositeur. Sur le disque d'exemples sonores sont proposées quatre de ses œuvres utilisant la synthèse par guides d'onde, *May all your children be acrobats* (voir Annexe 2 § 8.1, CD2 page 31), *Telegram to the president* (voir Annexe 2 § 8.2, CD2 page 32), *Silicon Valley Breakdown* (voir Annexe 2 § 8.3, CD2 page 33) et *Grass* (voir Annexe 2 § 8.4, CD2 page 34).

- Lors de l'enchaînement de plusieurs notes ou dans le cas d'une note suivie d'un silence, le brusque changement dans le son peut amener l'algorithme à provoquer un bruit parasite.
- Quand on veut lier deux notes ou réaliser un glissando, il est nécessaire de modifier la hauteur sans attaquer le son de nouveau.
- Pendant le jeu d'un instrument à corde réel, les cordes non utilisées doivent vibrer par sympathie.
- Si la corde de l'instrument est pincée à différents endroits, plus ou moins près de la touche ou du chevalet, le timbre est différent.
- Selon le style de musique, l'attaque des sons doit varier (pizzicato à la Bartok, etc.).
- Selon l'instrument (violon, violoncelle, guitare, clavecin), le son n'est pas amorti de la même façon.
- Une corde n'étant jamais parfaite dans la réalité, elle ne produit jamais un son parfaitement harmonique.

L'algorithme de base créé par Strong permettait de synthétiser des sons de cordes pincées. Les améliorations apportées par Karplus ont permis de synthétiser des percussions. Les apports successifs ont rendu possible l'émission de sons boisés et Smith s'est intéressé aux cordes frottées. Enfin, le modèle de Karplus / Strong a été généralisé à toute la synthèse par modèles physiques et c'est Julius Orion Smith qui a nommé cette technique générale *la synthèse par guides d'ondes*.

4.3. La synthèse par guides d'ondes de Julius Orion Smith

Le guide d'ondes est la simulation d'un corps vibrant le long duquel se propagent les ondes. Ce corps est généralement une corde ou un tuyau, mais il existe également des simulations d'objets à deux, voire trois dimensions. En utilisant une paire de lignes de retards (le modèle élémentaire de Karplus et Strong n'en utilisait qu'une), on peut simuler deux ondes qui voyagent le long d'une corde dans des directions opposées, qui se réfléchissent aux extrémités et repartent en sens inverse. Les deux formes d'onde progressent à travers les lignes de retard et sont renvoyées par les *filtres de réflexion* qui produisent une inversion de la phase et un léger amortissement dépendant de la fréquence (voir Figure 26).

Dans le modèle de Karplus / Strong, comme nous l'avons expliqué précédemment (au § II.4.1), la longueur de la ligne de retard correspond à une période de l'onde. Ici l'onde fait un aller retour et sa période équivaut à une demi-ligne de retard. On peut dire, de façon imagée, que les mouvements de l'onde de bas en haut du guide d'onde le font « résonner » à des fréquences liées à ses dimensions. Si le guide d'onde présente un changement de dimension ou recoupe un autre guide d'onde, sa façon de vibrer s'en trouve modifiée.

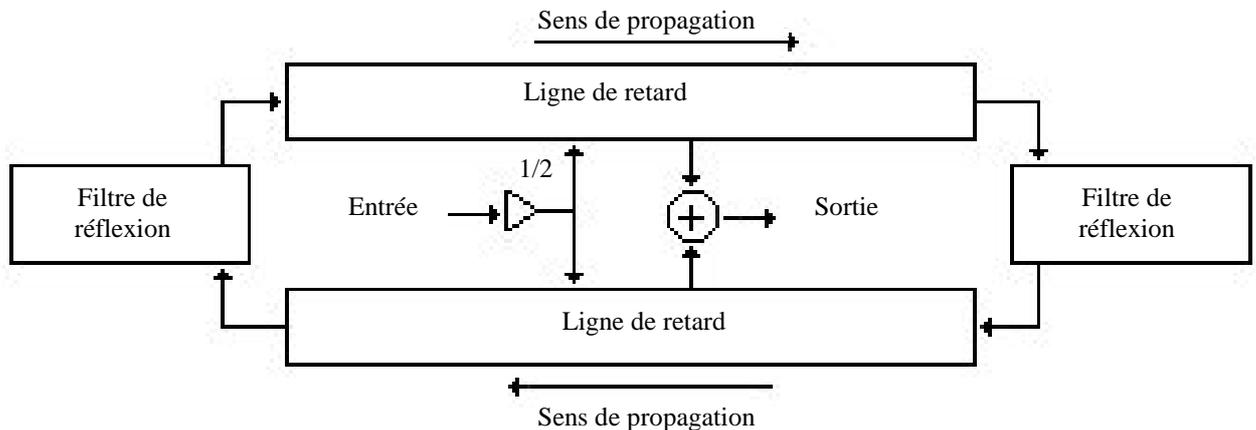


Figure 26 : Modèle de guide d'onde bidirectionnel d'une corde finie.

Pour créer un instrument, il est possible d'assembler plusieurs guides d'ondes et de les connecter par des modules de jonctions. Dans le cas des instruments à vent, chaque partie de section différente est simulée par un guide d'ondes. L'anche ou l'embouchure qui excite l'instrument est simulée par un oscillateur à consultation de table ou bien par un oscillateur non-linéaire plus complexe modélisé sous forme de mécanisme masse-ressort-amortissement. L'excitation par frottement constitue une exception et nécessite l'intervention d'une liaison particulière de jonction, par l'intermédiaire de laquelle pourront être introduites les caractéristiques de cette excitation. Ce même module de jonction permet la modélisation de trous dans un tube cylindrique. Notons d'ores et déjà qu'il sera nécessaire pour la création de maillages de guides en deux et trois dimensions. Enfin, un dernier type d'élément devra être introduit pour parfaire les diverses simulations, il s'agit de filtres pour simuler les effets des composantes de rayonnement des instruments, de la caisse de résonance des instruments à cordes ou encore du pavillon des instruments à vent. Ces divers modules intervenant dans la simulation de tous les instruments sous diverses formes sont résumés dans une représentation générique globale à la Figure 27.

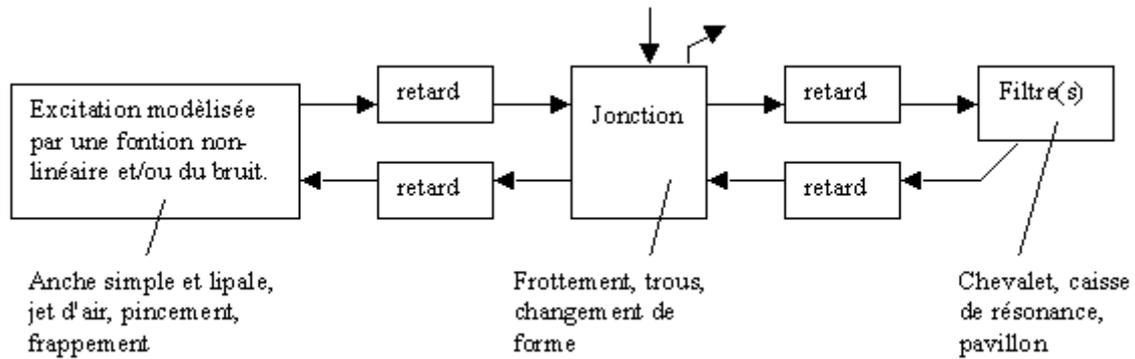


Figure 27 : Modèle instrumental générique en guides d'ondes.

Le modèle de clarinette réalisé par S. Hirschman, P. Cook et J. Smith est l'exemple d'un instrument « entier » réalisé à l'aide de guides d'ondes (voir Figure 28). Les changements de longueur du tuyau, lorsque les trous sont bouchés, sont simulés par une partie de longueur variable. L'instrument simulé réagit comme l'instrument réel, produit des « couac » lorsque les entrées appropriées sont fournies et génère différentes quantités d'harmoniques en fonction de l'amplitude du souffle.

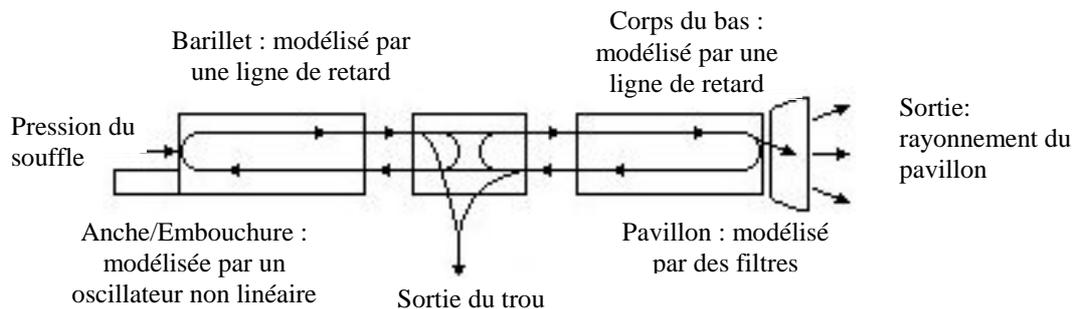


Figure 28 : Schéma d'une Clarinette synthétisée par des guides d'ondes d'après S. Hirschman, P. Cook et J. Smith⁵¹

⁵¹ P. Cook, S. Hirschman et J. O. Smith, « Digital waveguide modeling of reed woodwinds : an interactive development » in *Proceedings of the International Computer Music Conference*, San Francisco, International Computer Music Association, 1991, p. 301.

Pour générer des structures plus complexes que les cordes ou les tubes acoustiques cylindriques, le module de jonction, qui avait déjà été utilisé notamment dans des configurations d'enrichissement des modélisations de structures simples, est nécessaire. Cette liaison qui peut comporter plusieurs ports simultanément permet d'assurer la connexion de plusieurs guides d'ondes comme nous l'avons vu sur la représentation générique d'un modèle instrumental en guides d'ondes (voir Figure 27). Ce procédé peut être généralisé pour l'assemblage des lignes de retard suivant différentes positions.

Perry Cook utilise ce principe pour construire des tubes acoustiques de rayon irrégulier en joignant des segments de tubes cylindriques (voir Figure 29). Ce type de structure particulier est nécessaire, par exemple, dans le cadre de la modélisation d'un conduit vocal, qui constitue le fondement du logiciel SPASM de synthèse par guides d'ondes, de la voix chantée et parlée. Dans ce logiciel, le conduit vocal, assimilé à un tube acoustique, est discrétisé en plusieurs tubes élémentaires de différents rayons. Chacun d'eux est représenté par une ligne de retard bidirectionnelle élémentaire et connecté aux autres par l'intermédiaire d'une liaison de jonction assurant un ajustement des rayons des tubes discrets concomitants. Ce procédé peut être généralisé à la modélisation des formes des tubes acoustiques, s'écartant du tube cylindrique, utilisés pour les instruments à vent.

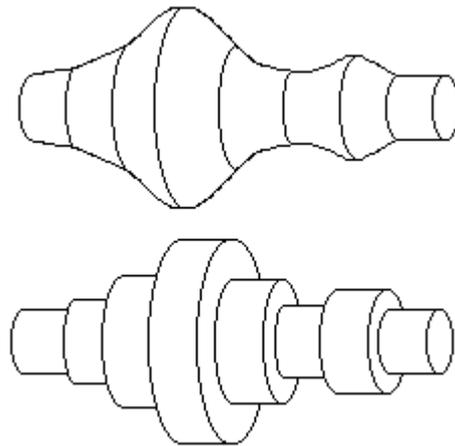


Figure 29 : Modélisation d'un tube de diamètre irrégulier grâce à des segments de tubes cylindriques.

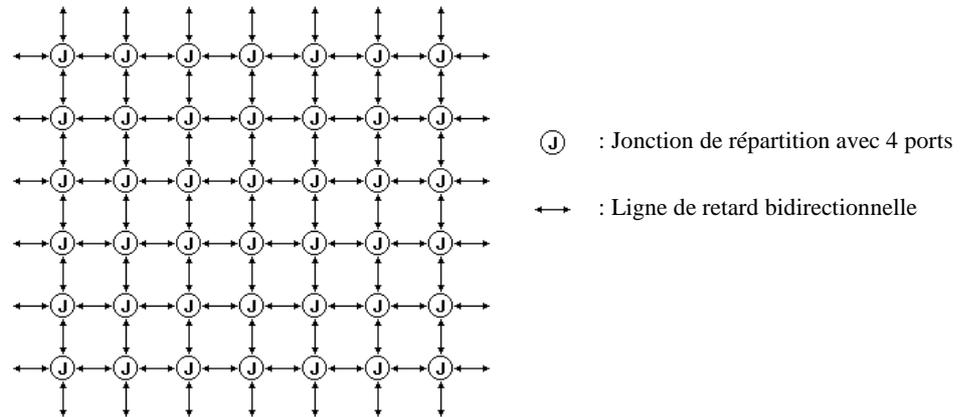


Figure 30 : Réseau de guides d'ondes à deux dimensions.

S. Van Duyne et J. Smith utilisent le module de jonction pour développer des proliférations de guides d'ondes suivant des réseaux à deux ou trois dimensions. Une surface plane est modélisée par des lignes de retard bidirectionnelles, correspondant à des unités de retard d'une période, réparties suivant un quadrillage, et connectées entre elles par des jonctions de répartition à 4 ports (voir Figure 30). A partir de ce type de réseau, des membranes et des plaques pourront être simulées avec toutefois adjonction de quelques conditions particulières.

La modélisation d'une membrane contraint à simuler également la présence de bords permettent la réflexion des ondes en inversant leur trajet, ce qui n'est pas le cas pour les plaques non encastrées. La généralisation de ce procédé permet la modélisation de réseaux cylindriques (voir Figure 31), ainsi que des volumes grâce à des réseaux en trois dimensions utilisant par conséquent des jonctions pourvues de 6 ports (voir Figure 32).

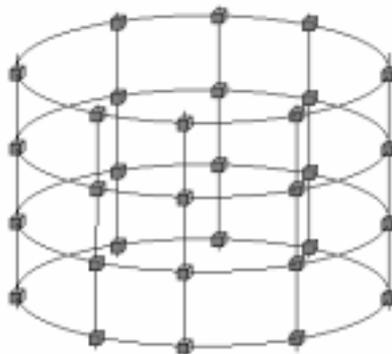


Figure 31 : Réseau de guides d'ondes cylindrique.

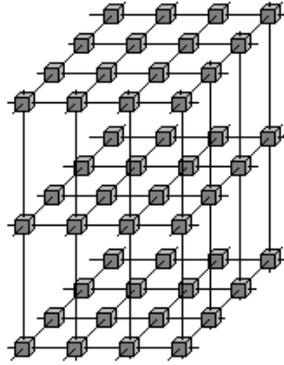


Figure 32 : Réseau de guides d'ondes à trois dimensions.

A partir de ces réseaux, S.Van Duyne et J. Smith ont envisagé la construction d'instruments plus complexes et plus complets. Ainsi la mise en œuvre d'un modèle de piano pourrait consister en une plaque (réseau à deux dimensions) qui représente la table d'harmonie en en possédant les principales caractéristiques, sur laquelle seront connectées les cordes par l'intermédiaire de points de jonction sur la plaque, qui devront donc être pourvus d'un port supplémentaire. Le même procédé d'assemblage peut permettre de créer un tambour en associant trois types de réseaux : un réseau à deux dimensions simulant la membrane, un réseau cylindrique raide modélisant le fût et enfin un réseau à trois dimensions représentant la contribution de l'air contenu dans le fût.

La synthèse par guides d'ondes permet donc de modéliser n'importe quelle structure. Elle peut-être couplée avec rigueur aux modèles physiques plus généraux de Cordis-Anima et Mosaïc. C'est en ce qui concerne la modélisation de guides d'ondes multidimensionnels, comme les cordes et les trous, qu'elle est le plus efficace. Tout en étant précise, elle conserve une simplicité de représentation rappelant l'algorithme de Karplus et Strong.

Pour le contrôle de cette synthèse, Perry Cook a développé un contrôleur de souffle polyvalent que nous allons décrire maintenant.

4.4. Le méta-contrôleur HIRN de Perry Cook

Le HIRN - *Meta-Wind Instrument Controller* - instrument polymorphe élaboré par Perry Cook, permet de « jouer » - grâce à divers capteurs (pression de l'air injecté, pression sur l'anche, tension des lèvres) et des éléments de contrôle purement mécaniques (clefs, parties rotatives ou coulissantes) -, de contrôler en temps réel des modèles physiques par

guides d'ondes, de clarinette, saxophone soprano, flûte, trompette et le passage de l'un à l'autre.

Le modèle est élaboré à partir des trois modèles décrivant les instruments à anche simple, lipale et à jet d'air, et permet de simuler, non seulement, ces trois catégories d'instruments comprenant la clarinette et le saxophone soprano, la trompette et le trombone, la flûte traversière et à bec, mais aussi des instruments hybrides. Les paramètres de contrôle de ce modèle particulier sont la raideur de l'anche, la tension des lèvres, la longueur du tube et celle des lignes secondaires, l'état des trous, la longueur du jet et la pression du souffle ainsi qu'un coefficient d'hybridation entre le type clarinette et le type flûte traversière/flûte à bec.

Les paramètres du modèle peuvent être contrôlés soit avec une interface graphique sur NeXT, soit via MIDI, c'est à cette fin que le HIRN a été élaboré. Il possède de nombreux capteurs et une structure variable s'adaptant aux modes de jeu des différents instruments. Des capteurs mécaniques comme des clefs ou pistons pour le jeu des bois et des cuivres, une partie coulissante de l'instrument associée au jeu du trombone, des parties rotatives permettant de passer d'une embouchure de clarinette à celle de la flûte à bec mais aussi de la flûte traversière.

Au niveau de l'embouchure, des capteurs permettent de détecter, la pression de l'air injecté, la pression exercée sur l'anche, la tension des lèvres mais aussi la hauteur (permettant de pouvoir chanter dans l'instrument...). Ces signaux captés sont directement associés aux paramètres correspondants du modèle.

Cet instrument permet le contrôle en temps réel de l'ensemble des paramètres internes à la modélisation par guides d'ondes des instruments à vent, grâce à des fonctions standards de contrôle MIDI. Le HIRN exploite les modes de contrôle des instruments à vent et ajoute de nombreux degrés de liberté supplémentaires pour le contrôle. Des pédales ou autres contrôleurs peuvent être ajoutés au HRN pour contrôler le modèle.

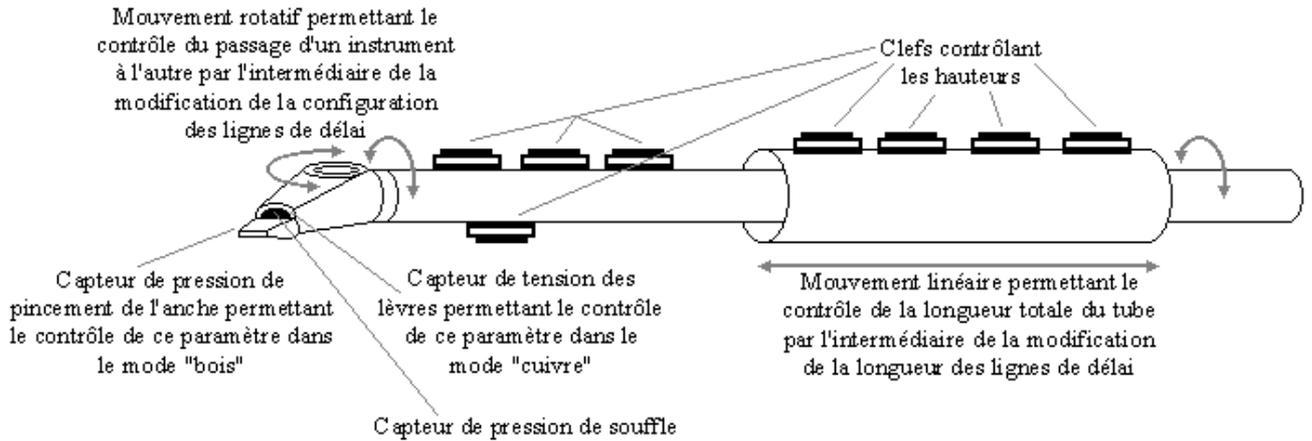


Figure 33 : Représentation schématique du contrôleur HIRN avec ses principales fonctions⁵².

Cette technique de modélisation par guides d'ondes, qui permet la simulation d'un très large panel d'instruments, est maintenant très répandue. Elle fait l'objet de nombreux développements ; peuvent être cités entre autres les travaux de Perry Cook avec des simulations d'instruments à vent contrôlés en temps réel avec un dispositif instrumental spécifiquement adapté, ou encore des modélisations de la voix chantée ou parlée, ainsi que des simulations de guitare et de flûte effectuées par l'équipe de Matti Karjalainen en Finlande. Enfin, une des preuves de son succès, réside dans son implantation dans les synthétiseurs. Les contrôleurs utilisés avec ces synthétiseurs, la série des WX- de Yamaha par exemple, sont largement inspirés du contrôleur HIRN de Perry Cook. Ces synthétiseurs et leurs contrôleurs feront donc l'objet de notre prochain chapitre.

⁵² Simplification d'un schéma proposé par P. Cook dans « A Meta-Wind-Instrument Physical Model, and a Meta-Controller for real time performance control », in *Proceedings of the International Computer Music Conference*, San Francisco, International Computer Music Association, 1992, p. 275.

5. Les applications industrielles

La synthèse par modèles physiques est une technique nouvellement apparue : il y a donc peu d'applications pour l'instant. Les synthétiseurs créés jusqu'alors sont le résultat d'une longue expérimentation et d'améliorations constantes, mais ils sont conçus pour tirer le meilleur parti de techniques travaillant sur le son lui-même. Pour l'application des modèles physiques, les producteurs ont utilisé l'ergonomie de ces synthétiseurs dont on connaît le succès commercial et auxquels les acheteurs sont habitués. Mais il va de soi que cette ergonomie ne sera pas forcément appropriée pour exploiter au mieux les possibilités des modèles physiques. Pour une technique aussi nouvelle, les applications ne peuvent être parfaites, de plus, le public change difficilement ces habitudes : ces deux problèmes majeurs font obstacle à la réussite commerciale de la synthèse par modèles physiques. Pourtant, ces problèmes se résoudront avec le temps. Au fur et à mesure que les applications seront perfectionnées et améliorées, parallèlement le public prendra progressivement connaissance de leur existence. Cependant, les modèles physiques induisent un retour à l'apprentissage instrumental qui pourrait déplaire au grand public. Et il faut porter l'attention sur le fait que c'est le grand public, donc des amateurs en grande partie qui déterminent le marché. Evidemment les musiciens constituent une clientèle importante, mais ils ne seront pas intéressés par ces machines encore trop peu au point.

Mis à part ces problèmes, les synthétiseurs utilisant la technique des modèles physiques ont des avantages qui seront bien vite remarqués par les utilisateurs et qui leur donneront l'ascendant sur les synthétiseurs traditionnels. Ces synthétiseurs traditionnels utilisent les synthèses analogiques, par modulation de fréquence, des échantillons préenregistrés ou d'autres techniques basées sur la création et manipulation du son lui-même. Des manipulations de plus en plus nombreuses et de plus en plus fines (portant sur l'enveloppe, les effets,...) peuvent être effectuées pendant l'édition du son et même pendant le jeu grâce à des pédales, manettes, roues, contrôleurs à ruban⁵³, écrans tactiles... Tous les avantages de ces synthétiseurs, nous les connaissons bien, cependant, nous connaissons

⁵³ Les contrôleurs à rubans réagissent à la position du doigt sur un axe et à la pression exercée, l'écran tactile réagit également à la pression mais la position du doigt est définie sur un plan.

aussi les sérieuses limitations inhérentes aux techniques de synthèses utilisées, elles se résument toutes sous le terme : *Expressivité*.

Il est difficile, voire impossible, avec un synthétiseur de ce type de donner, même à une partie soliste, toute la finesse et l'expressivité que l'instrument acoustique offre. Une trompette, par exemple, offre des nuances de timbre importantes du pianissimo au fortissimo. Le vibrato d'un instrument réel, si mal imité par les synthétiseurs, est modulé en hauteur, en vitesse et en timbre, de plus il est passablement irrégulier et c'est ce qui lui donne son aspect vivant. Les différentes attaques dues au mouvement de la langue influencent beaucoup le son sans compter les effets de « growl ». Les synthétiseurs permettent des contrôles fins de l'enveloppe du son mais aucun pour l'attaque. Le son d'un instrument réel évolue dans sa masse parce que le musicien *joue* le son et ne se contente pas de le déclencher en appuyant sur une touche.

Le défaut le plus gênant de ces synthétiseurs est leur manque de jouabilité. Car si la manipulation des paramètres du son pendant le jeu permet, en théorie, de lui donner une certaine expressivité, dans la pratique, cela reste très difficile et seuls quelques petits virtuoses en coordination des mouvements arrivent à jouer sur le clavier et à manipuler en même temps les pédales, les roues, les contrôleurs à rubans, et appuyer sur les boutons pour modifier la valeur des paramètres du son. Et quand bien même on arrive à produire de la musique, digne de ce nom, de cette manière, il est clair que la performance tient plus du jonglage et du cours de physique que de l'exécution musicale. Quel musicien voudrait faire de la musique de cette façon ?

Quand on considère tout ce qui manque à ces synthétiseurs, les modèles physiques semblent pouvoir se faire une belle place sur le marché. Nous allons donc, à travers l'examen de différents synthétiseurs existants faire le bilan critique de l'application commerciale de la technique de synthèse par modèles physiques.

5.1. les synthétiseurs utilisant la synthèse par modèles physiques

Yamaha, Korg et Technics sont les premiers constructeurs à avoir tenté d'utiliser la technique de synthèse par modèles physiques. Leurs stratégies commerciales sont différentes, et leurs démarches bien distinctes. Il faut préciser que tous les synthétiseurs, utilisant la synthèse par modèles physiques, que nous allons présenter, emploient en fait

exclusivement les modèles de guides d'ondes. Si les constructeurs adoptent cette synthèse en lui donnant des noms très divers, il s'agit bien toujours de la même technique.

Ainsi, Yamaha est le premier à tenter une commercialisation de cette synthèse par modèles physiques sous le nom de *synthèse VA* (Virtual Acoustic Synthesis). Ce synthétiseur de Yamaha est le VL1, le premier et le seul (à part le VP) utilisant à cent pour cent les modèles physiques. Conçu pour tirer avantage d'un contrôleur de souffle, il s'adresse aux utilisateurs musiciens et tout particulièrement aux saxophonistes. Le retour à un apprentissage instrumental, la totale nouveauté de cette machine et son prix élevé provoquent l'échec commercial de ce synthétiseur. A partir de là, Yamaha ne prend plus le risque de produire un synthétiseur utilisant uniquement la synthèse par modèles physiques. La série des synthétiseurs EX- ne fait qu'ajouter une petite partie de synthèse physique, un module, dans un synthétiseur traditionnel.

Korg s'engage, après Yamaha, dans la tentative de commercialisation de cette technique et profite de l'exemple du VL1. Korg ne tient pas trop à bouleverser totalement les habitudes de ses consommateurs. Il présente directement la synthèse par modèles physiques comme une nouveauté, un petit plus ajouté aux synthétiseurs habituels, et, la présente intégrée à son système MOSS (Multi Oscillator Synthesis System). Quelques modèles de cordes et d'anches sont proposés mais seuls les paramètres sont modifiables. Aucune construction complète partant d'éléments instrumentaux, à la manière de Mosaïc (voir § II.3.2), n'est proposée.

Enfin Technics tire également parti de cette nouvelle technique et l'intègre au sx-WSA1.

5.1.1. La série des synthétiseurs VL et VP de Yamaha

La particularité de ces deux séries de synthétiseurs est qu'elles utilisent à cent pour cent la synthèse par modèles physiques. Aucune autre technique n'est utilisée parallèlement.

Il existe toute une série de synthétiseurs VL, mais parmi eux, le VL1 (voir Figure 34), commercialisé en 1994, est le plus abouti. Le VL70 n'est qu'une simplification du VL1 et les VL1-m et VL70-m (voir Figure 35) sont des expandeurs, modules de synthèse dont la seule différence est de ne posséder ni clavier, ni contrôleurs. Nous ne nous

intéresserons donc qu'au VL1⁵⁴. Ce synthétiseur, commercialisé en 1994, utilise uniquement la technique des modèles physiques par guides d'onde. Les formes d'ondes sont issues des algorithmes modélisant l'acoustique des instruments réels ce qui permet un jeu expressif et induit un tout nouveau rapport au synthétiseur. Il ne fait pas de doute que Yamaha avec le VL1 marque une étape dans l'histoire des synthétiseurs et engage la performance musicale dans une nouvelle dimension.



Figure 34 : Le synthétiseur VL1 de Yamaha⁵⁵.

Ce synthétiseur permet la modélisation des instruments à anche simple et lipale, à jet d'air, et les cordes pincées et frottées, conçus par association d'éléments, tubes, anches, etc. Sont disponibles, des résonateurs : cordes ou tubes à conicité variable auxquels sont associés des modules de terminaison, des pavillons, et des modes d'excitation qui sont modélisés de même : anche simple et lipale, jet d'air, pincement et frottement. Des commandes en temps réel mettent en œuvre l'excitation. Le contrôle paramétrique des différentes composantes de l'instrument permet de modifier ses caractéristiques. Une certaine forme de modularité peut être exploitée pour donner naissance à des instruments entre l'instrument à vent et à cordes frottées. Il est également possible de créer des hybridations entre les instruments à jet d'air et à anche simple comme dans le système de P.Cook (voir § II.4.4).

Le VL1 peut-être utilisé avec un contrôleur de souffle du type WX- (voir § II.5.1.3), ce qui permet de retrouver la finesse du jeu d'un instrument à vent⁵⁶, chose impossible avec un simple clavier. Apprendre à maîtriser l'utilisation d'un VL1 avec un contrôleur de souffle est plus aisé que d'apprendre à jouer d'un instrument acoustique et

⁵⁴ Des sons réalisés par le VL1 sont proposés sur le disque d'exemples sonores (voir Annexe 2 § 6, CD2 page 3 à CD2 page 20).

⁵⁵ Image « yamahavl.jpg » extraite de : <http://members.aol.com/Patchman1/yamahaVL1.html>.

⁵⁶ A titre d'exemples, nous pouvons écouter des sons du VL1, proposés sur le disque d'exemples sonores (voir Annexe 2 § 6) : un son de cornemuse (CD2 page 4), un son de basson (CD2 page 5) et un son de clarinette (CD2 page 6).

permet de jouer n'importe quel instrument à vent avec un seul et même dispositif de contrôle. Il est, de plus, possible d'obtenir avec des instruments virtuels des effets impossibles dans la réalité : un ambitus gigantesque, une virtuosité impossible avec les contraintes de l'instrument réel, etc. Le VL1 permet l'exploration de nouvelles perspectives de jeux et une nouvelle forme d'expressivité lors de l'exécution. La technologie des modèles physiques demande beaucoup de puissance à la machine, la polyphonie est donc réduite à deux voix, mais finalement, pour profiter des possibilités d'expressivité, il est préférable de travailler sur une partie solo, la polyphonie n'est donc pas indispensable.

Pourtant le VL1 a ses défauts. Yamaha n'a pas été capable d'atteindre un degré acceptable de réalisme ou même simplement une simulation utilisable pour plusieurs des voix du VL1 : certains sons ont beau être excellents d'autres sont pauvres et inutilisables. Pourtant, les autres fabricants qui ont investi dans la recherche et le développement des modèles physiques n'ont pas atteint la qualité du VL1, ce qui laisse imaginer la difficulté de créer une bonne synthèse par modèles physiques. Les premières remarques de la presse étant franchement enthousiastes, Yamaha a sans doute pensé raisonnable de demander 5000\$ pour ce VL1, pourtant peu de clients ont accepté de payer un tel prix. Malgré ses qualités et son aspect innovant, le VL1 n'a pas très bien marché commercialement. Les autres producteurs comme KORG ont préféré attendre de voir l'accueil réservé au VL1 et ont convenu de ne pas se jeter si rapidement dans cette voie périlleuse. L'échec commercial de ce synthétiseur est du en partie à son aspect trop peu familier, mais également aux goûts des principaux acheteurs qui sont plus des amateurs que de véritables musiciens. De nombreux utilisateurs de synthétiseurs sont heureux d'avoir des sons synthétiques, avec beaucoup de distorsion ou d'autres effets. Pour ces utilisateurs, le prix était bien trop élevé pour un synthétiseur avec seulement 2 voix de polyphonie. Ces amateurs de synthétiseurs sont souvent des clavieristes et ne savent pas se servir d'un contrôleur de souffle, et utiliser un VL1 sans contrôleur de souffle est, pour la plupart des sons, un crime. Ajoutée à tout cela, la façon peu familière d'éditer les sons constitue une barrière qui explique la médiocrité des ventes. Les revendeurs n'osaient pas prendre de VL1 en stock car ils les pensaient invendables. Quel employé aurait pu faire une démonstration convaincante d'un synthétiseur avec un contrôleur de souffle qui demande un véritable apprentissage instrumental ? Ce VL1 s'adressait plutôt à des musiciens avertis jouant d'un instrument à anche simple mais ces derniers fréquentent rarement les magasins de synthétiseurs, ils ont

sur la médiocrité de leurs possibilités musicales des préjugés tenaces ou bien ils sont effrayés par l'aspect technique de leur utilisation.

Afin d'améliorer les ventes, en 1996, Yamaha propose une nouvelle présentation du VL1 avec une amélioration des voix et des options d'édition, ainsi qu'une baisse appréciable du prix. Plus tard, à cause du déficit des ventes, Yamaha décide d'abandonner la production de tous les synthétiseurs VL à part le VL70-m (voir Figure 35). D'autres offres de Yamaha comprennent les fonctionnalités du VL70-m.



Figure 35 : Le module de synthèse VL70-m⁵⁷.

Le VP1, très proche du VL1 et utilisant toujours exclusivement les guides d'ondes, est dédié aux modélisations de percussions, membranes et leurs dérivés, et cordes et offre une polyphonie de 16 notes.

Après l'apparition du VL1, il est devenu évident que la synthèse physique deviendrait une technique de synthèse présente dans toutes les productions qui suivraient. Il semblait également inévitable, à mesure que son emploi touchait de plus en plus de domaines, que son prix baisse énormément. Ces deux prévisions se sont avérées correctes et la modélisation physique est utilisée maintenant d'une façon ou d'une autre dans la plupart des synthétiseurs. Cependant, après l'échec relatif d'un synthétiseur utilisant uniquement les modèles physiques, les autres productions l'intégreront sous forme d'un module particulier compatible avec d'autres modes de synthèse.

5.1.2. La série des synthétiseurs EX- de Yamaha

Parmi les synthétiseurs EX- de Yamaha, seuls les modèles EX5 (1998) et EX5R utilisent la synthèse par modèles physiques. Le EX7 (1998), version simplifiée du EX5 ne possède pas de sons générés par modélisation physique. Il est révélateur de voir que la

⁵⁷ Image « VL70MA.JPG » et « VL70MB.JPG » extraites de : <http://www.yamahasynt.com/pro/vl70m/intr1.html>.

simplification porte sur ces derniers : la modélisation physique est encore considérée comme un plus, une technique compliquée et marginale.



Figure 36 : Le synthétiseur EX5 de Yamaha⁵⁸.

Le EX5 (voir Figure 36) est un synthétiseur doté d'un clavier de 76 touches, 3 roues de modulation, un contrôleur à ruban et 6 boutons pour des contrôles personnalisés et permettant l'utilisation d'un contrôleur de souffle comme pour le VL1 (voir § II.5.1.3). Le EX5R (voir Figure 37) est l'expandeur correspondant.



Figure 37 : Le EX5R de Yamaha⁵⁹.

Les lettres EX sont utilisées pour « extended synthesis » ce qui signifie que plusieurs types de synthèses sont utilisés pour générer les sons de ce synthétiseur. Il est difficile de vouloir imposer aux consommateurs une technique entièrement nouvelle, surtout quand celle-ci n'est pas encore totalement au point (certains défaut n'apparaissent qu'avec le recul). Mêler cette nouvelle technique aux anciennes permet à l'utilisateur de s'y habituer en douceur, de plus la comparaison qu'il effectue entre les anciennes techniques et les modèles physiques lui permet de mieux voir ce qu'ils lui apportent. Ainsi les synthétiseurs EX- mêlent la synthèse AWM⁶⁰, la synthèse AN⁶¹, la synthèse FDSP⁶² et la

⁵⁸ Image « Ex5_f.jpg » extraite de : <http://www.synth.yamaha.de/EX5.HTM>.

⁵⁹ Image « Ex5r_f.jpg » extraite de : <http://www.synth.yamaha.de/EX5R.HTM>

⁶⁰ Synthèse AWM (Advanced Wave Memory) : permet de façonner et contrôler les sons échantillonnés stockés dans le synthétiseur, grâce à un générateur d'enveloppe, des filtres, etc. Il permet également de combiner plusieurs échantillons différents en guise d'attaque, de soutien et de chute du son.

⁶¹ Synthèse AN (Analog Physical Modeling) : émulation de synthétiseur analogique offrant les avantages des traditionnels synthétiseurs analogiques et la stabilité, la reproductibilité et la précision de contrôle des techniques digitales.

⁶² Synthèse FDSP (Formulated Digital Sound Processing) : processeur générant des effets (reverb, chorus,...) dépendants de la note jouée. Contrairement aux effets fixes, le système FDSP contrôle les paramètres des effets en fonction de la note jouée et de sa vélocité.

synthèse VA (Virtual Acoustic Synthesis) qui n'est autre que la synthèse par modèles physiques.

Les sons échantillonnés contenus dans la mémoire de ce synthétiseur sont réalistes mais ne peuvent pas vraiment être manipulés en direct ce qui empêche toute expressivité. C'est le contraire pour les sons par modèles physiques : ils ne sont pas vraiment convaincants au point de vue sonore mais sont extrêmement manipulables. Ce synthétiseur permet donc une alliance des deux types de synthèse ce qui permet d'augmenter la qualité de l'exécution sonore. Si, actuellement, la technique de modélisation physique n'est pas encore totalement au point, il est visible qu'elle peut déjà apporter beaucoup en étant associée à d'autres techniques plus anciennes.

Le défaut majeur qui apparaît lors de l'utilisation de ce synthétiseur est son ergonomie. L'édition des sons est très complexe ; il y a beaucoup trop de paramètres à spécifier, de plus l'écran est trop petit pour avoir une vision claire de tous les paramètres d'un son.

5.1.3. Les contrôleurs de souffle WX- de Yamaha



Figure 38 : Le contrôleur de souffle WX5 de Yamaha⁶³.

Les contrôleurs WX- de Yamaha comme le WX5 (voir Figure 38) et le WX7⁶⁴ (voir Figure 39) sont des contrôleurs de souffle MIDI orientés vers les anches simples. Le WX- présente au choix une embouchure de type saxophone ou de type flûte à bec. Les doigtés sont basés sur ceux du saxophone mais, en plus, des clefs sous le pouce gauche permettent d'atteindre un ambitus de 6 octaves (une position neutre par défaut, plus deux octaves dans le grave et trois dans l'aigu) certains doigtés spéciaux permettent d'atteindre 7 octaves. Il est possible de choisir entre 4 modes de doigtés (Saxophone a, b, c ou Flûte) pour une plus grande facilité de jeu. D'autres commutateurs permettent de transposer l'instrument en Do3, Sib2 ou Mib3 (note jouée par l'instrument lorsque toutes les clefs sont

⁶³ Image « WX5.JPG » extraite de : <http://www.yamahasynt.com/pro/wx5/intr1.html>.

⁶⁴ Le WX7 a été utilisé pour contrôler l'exécution des sons du VL1 proposés sur le disque d'exemples sonores (CD2 page 3 à CD2 page 20).

fermées) pour les usagers plus habitués aux doigtés de saxo alto, saxo baryton ou saxo ténor et clarinette. Une roue de modulation permet, comme sur un synthétiseur, de faire varier la hauteur tout en jouant. Un bouton permet de changer, depuis le WX-, les programmes du synthétiseur auquel il est connecté, par l'intermédiaire du langage MIDI. La vitesse de réponse de l'instrument peut également être réglée.



Figure 39 : Le contrôleur de souffle WX7 de Yamaha⁶⁵.

Le WX- traduit le souffle et la pression des lèvres du musicien en données MIDI par l'intermédiaire de capteur de souffle et de pression de haute résolution qui peuvent être calibrés pour capter au mieux les nuances et l'originalité d'un jeu personnel. Un commutateur permet d'associer la pression au volume pour les synthétiseurs traditionnels qui ne comprennent pas les indications de pression et ne font pas varier le spectre du son en fonction de celle-ci. D'autres commutateurs permettent d'utiliser ou non d'autres propriétés de l'instrument comme la fluctuation de la hauteur, du volume, du timbre dues à l'action exercée sur l'anche pendant le jeu. Par exemple, des commutateurs permettent de choisir si la vitesse d'attaque et l'amplitude de tenue des sons sont fixe ou bien proportionnelles à la pression du souffle. On peut les désactiver pour rendre l'appareil compatible avec un synthétiseur ou pour rendre le jeu plus simple (les clavieristes par exemple auront du mal à contrôler la fluctuation de la hauteur) mais c'est se priver des capacités exceptionnelles de ce contrôleur.

Les interfaces de contrôle du souffle ne sont pas exclusivement utilisées par Yamaha. Evidemment, tous les autres fabricants prévoient l'utilisation de ces contrôleurs avec leurs synthétiseurs. Chaque fabricant produit ses propres modèles de contrôleurs de souffle qui sont globalement semblables à ceux présentés.

⁶⁵ Image « WX7.JPG » extraite de : <http://www.sky.net/~kennyb/wx7/>.

5.1.4. Le Korg Oasys

Le synthétiseur Oasys (Open Architecture SYnthesis System 1996) de Korg est une machine tout à fait particulière. Sa présentation pourtant est assez traditionnelle. Il est équipé d'une interface graphique, tactile et intuitive, d'un clavier 76 touches, d'un contrôleur à ruban⁶⁶ sensible à la pression, d'une manette de modulation, et offre la possibilité d'ajouter un contrôleur de souffle.

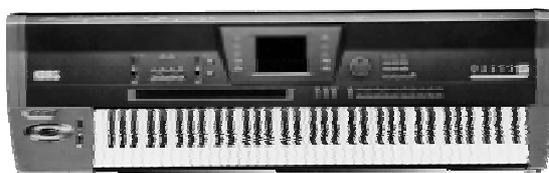


Figure 40 : Le synthétiseur Oasys de Korg, équipé du système DSP⁶⁷.

Ce qui fait la grande nouveauté de ce synthétiseur, c'est son fonctionnement interne. Il est équipé du « Digital Signal Processor (DSP) System », il s'agit d'une architecture à processeurs multiples de signal digital qui lui apporte une grande puissance de calcul. Oasys est pourvu d'une mémoire et d'une capacité de calcul énorme car au lieu de posséder une mémoire ROM (ineffaçable) où sont stockés les algorithmes de synthèse, ceux-ci sont stockés dans une mémoire RAM (modifiable). Plutôt que de dédier des parties matérielles du synthétiseur aux oscillateurs, filtres et autres, Oasys utilise des fonctions logicielles pour les produire. Ces logiciels informatiques lui permettent d'utiliser n'importe quels algorithmes de synthèse que l'on rentre en mémoire. Ainsi, Oasys peut utiliser les synthèses analogiques, FM, additive, vectorielle, par échantillonnage, par filtres résonnants, par guides d'ondes, mais aussi des techniques qui apparaîtront dans le futur. Des algorithmes seront mis au point pour appliquer cette technique et Oasys sera capable de les mettre en œuvre sans mise à jour du système, même s'ils sont totalement nouveaux et inconnus jusqu'alors. Les effets eux-mêmes sont chargés avec leurs propres algorithmes.

⁶⁶ Le contrôleur à ruban est un petit écran sensible au toucher et à la position du doigt posé dessus (position traduite par des coordonnées X,Y). Il permet de contrôler deux paramètres à la fois et ceci pendant le jeu. Ce système a un grand potentiel expressif mais s'il surpasse les boutons, roues, pédales, il reste inférieur aux contrôleurs spécifiques comme le contrôleur de souffle.

⁶⁷ Image « OASYS.GIF » extraite de : <http://www.harmony-central.com/Newp/WNAMM96/Korg/oasys.html>.

Chaque son, voire même, chaque composante du son peut-être généré par une technique (ou une combinaison de techniques) différente, issue d'un algorithme totalement différent. Cette flexibilité inédite permet d'obtenir des sons exceptionnels avec un contrôle personnalisé et spécifique à chacun d'eux, induisant une grande expressivité musicale.



Figure 41 : La carte Oasys PCI pour Macintosh⁶⁸.

Le principe d'un synthétiseur comme Oasys, basé uniquement sur un principe logiciel ne semble pas s'être imposé. Certains autres synthétiseurs utilisent une partie logicielle mais elle est très limitée et le reste de l'architecture du synthétiseur est fixé. La complexité du système a fait d'Oasys, une plate-forme de développement pour la compagnie Korg, plus qu'un synthétiseur commercial. La commercialisation de nouveau matériel utilisant ce principe semblait définitivement abandonnée jusqu'à août 1999 où Korg a produit une Carte PCI permettant une synthèse sur une base logicielle. Cette « Oasys PCI » est conçue pour la plate forme MAC et peut être associée à n'importe quel séquenceur MIDI. La carte contient des centaines de sons issus de 28 algorithmes de synthèse, et 135 algorithmes d'effets. Le système est évidemment extensible. La version PC est attendue en 2000.

La technologie Oasys a été réutilisée dans le synthétiseur monophonique Prophecy, mais également dans le Trinity qui a hérité de son interface tactile et intuitive, et dans le Z1 qui intègre des algorithmes conçus grâce à Oasys mais ne permet pas d'en produire de nouveaux. Nous allons maintenant voir en détail ces trois synthétiseurs.

5.1.5. Le Korg Prophecy

Commercialisé en novembre 1995, le Prophecy (voir Figure 42) peut-être acquis pour lui-même ou comme option avec le Trinity. C'est une machine avec une capacité de

calcul assez élevée, conçue sur le modèle du VL1 avec une polyphonie limitée, mais une grande capacité d'expressivité. Malgré tout ce qui les sépare, le Prophecy représente la meilleure alternative au VL1 pour l'instant et il est le premier susceptible de lui faire concurrence. C'est le seul synthétiseur avec le VL1 qui propose une synthèse physique complète de sons acoustiques, mais il n'est pas aussi performant car Korg n'a pas investi véritablement dans le développement des modèles physiques.



Figure 42 : Le synthétiseur Prophecy de Korg⁶⁹.

Le Prophecy est pourvu du système MOSS (Multi Oscillator Synthesis System) qui utilise un puissant processeur (des millions d'opérations par seconde) effectuant tous les calculs nécessaires à l'émission d'un signal digital pour la création du son. Il consiste en une émulation de sept oscillateurs, combinés pour obtenir cinq types de synthèse : la synthèse analogique classique, la synthèse soustractive, la synthèse VPM (variable phase modulation), la synthèse croisée et modulation en anneau, et la synthèse par modèles physiques utilisant la technique des guides d'ondes et comprenant un modèle de cuivre, d'anche et de cordes pincées. Ces différents types de synthèse peuvent être associés pour obtenir des sons très complexes. Grâce au système MOSS, Korg joint les modèles physiques aux techniques précédentes et ne prend pas le risque de produire un synthétiseur utilisant uniquement les modèles physiques.

Pour éditer les sons de style analogique, il est nécessaire d'ajuster les fréquences des oscillateurs mais pour les modèles physiques les modifications portent sur les paramètres physiques de l'instrument comme la taille de l'embouchure et son type (anche lipale, simple ou double, biseau...). Ce synthétiseur peut utiliser le langage MIDI, ce qui présente un avantage par rapport aux autres synthétiseurs comme le Wave Drum de Roland (voir § II.5.2.1). Le Prophecy n'est pas conçu pour tirer avantage d'un contrôleur de souffle, il n'est pas non plus orienté vers une imitation fidèle des sons acoustiques.

⁶⁸ Image « Oasis-PCI.jpg » extraite de : <http://www.harmony-central.com/Newp/SNAMM99/Korg/Oasis-PCI.html>.

Malgré le soin porté à l'ergonomie de ce synthétiseur possédant de nombreux contrôleurs (clavier sensible, boutons, roues, contrôleurs à ruban) et un agréable écran de grande taille, l'interface de réglage et programmation des sons pose problème. Elle est beaucoup plus complexe que sur les autres synthétiseurs. Le grand nombre de contrôles possibles aurait du être un avantage mais malheureusement ils rendent l'interface utilisateur difficilement compréhensible. Les démonstrateurs des magasins ne savent même pas s'en servir. Dans ces conditions, il est difficile de convaincre un acheteur éventuel.

Le Prophecy satisfera donc surtout les musiciens qui apprécient les sons synthétiques, qui aiment programmer leur synthétiseur, personnaliser les sons et jouer avec de nombreux contrôleurs durant l'exécution. En ce qui concerne les modèles physiques, l'appareil n'est pas vraiment au point, la modification des sons et les contrôles nécessaires à une exécution expressive sont peu maniables. Le Prophecy a des capacités intéressantes mais reste vraiment trop peu ergonomique. Son successeur direct est le synthétiseur Z1.

5.1.6. Le Korg Z1

Paru en 1997, le Z1 est une extension du Prophecy avec plus de sons, plus de modèles physiques et plus d'options de performance. Il conserve tous les modèles physiques du Prophecy, (modèles de cordes, d'anches simples, doubles et lipales) mais modifiés pour tirer parti de l'écran tactile, plus quelques modèles de percussion qui peuvent être édités. Comme le prophecy, le Z1 possède le processeur MOSS, et utilise donc de nombreuses autres techniques de synthèse en dehors des modèles physiques. Le modèle d'orgue, par exemple, utilise conjointement les modèles physiques et les échantillons conventionnels, ce qui permet d'ajouter les jeux au fur et à mesure comme sur un orgue véritable en actionnant les tirettes. Le Z1 offre une palette de sons allant de l'imitation des instruments réels à l'imagination.

Le Z1 dans sa configuration de base comprend 5 octaves et 12 voix de polyphonie qui permettent une simulation plus convaincante des modèles de clavier comme le clavecin réalisé avec un modèle de corde pincée.. Chaque voix est issue d'une paire d'oscillateurs dirigée par modélisation physique, plus un « sub-oscillateur » et un générateur de bruit. On peut utiliser jusqu'à 6 timbres simultanés répartis sur 6 canaux MIDI. Chaque partie peut

⁶⁹ Image « prophecy2.gif » extraite de : <http://www.imagnet.fr/Keyboards/prophecy.htm>.

être dérivée d'un modèle différent et être associée à une partie du clavier. Z1 est le premier synthétiseur multitimbral par modèles physiques. Un grand choix d'effets peut être ajouté à chacun des 6 timbres possibles.



Figure 43 : Le synthétiseur Z1 de Korg⁷⁰.

Le clavier du Z1 est sensible à la vitesse et au toucher et ceci est complété par 12 contrôles personnalisés (4 boutons de filtres et 8 boutons d'enveloppes), la roue de variation de hauteur et de modulation, un contrôleur à ruban, et 4 entrées de pédale. Par contre aucune entrée n'est prévue pour un contrôleur de souffle ce qui est dommage vu le nombre de voix d'instruments à vent proposées. Il est également étonnant que ce synthétiseur qui se targue d'être multitimbral ne possède qu'une paire d'entrée/sortie. Les modifications des sons synthétisés par modèles physiques portent sur les réglages des paramètres, mais aucune construction intégrale de l'instrument n'est proposée.

Il existe un autre successeur au Prophecy en dehors du Z1, c'est le Trinity, commercialisé un an plus tard.

5.1.7. Le Korg Trinity

Lancé en 1996, le Trinity (voir Figure 44) existe sous plusieurs formes (Trinity, Trinityplus, pro, pro-X) mais de l'une à l'autre seule la taille du clavier diffère. Il est possible d'apporter des extensions au Trinity pour lui ajouter les fonctionnalités du Z1 et du Prophecy. Trinity utilise deux sources pour générer le son : le processeur MOSS et le processeur ACCESS (Advanced Control Synthesis System). Le système MOSS, hérité du Prophecy, lui permet de couvrir un grand nombre de techniques de synthèse dont la synthèse par modèles physiques, comme nous l'avons décrit précédemment (voir § II.5.1.5).

⁷⁰ Image « Z1.JPG » extraite de : <http://www.planet-groove.com/korg/z1.html>.



Figure 44 : Le synthétiseur Trinity de Korg⁷¹.

Tous les Trinity possèdent un écran tactile de haute résolution 320 x 240, donnant une vision claire des fonctions et paramètres à régler. Des paramètres peuvent être associés aux roues, contrôleur à ruban, manette, boutons et pédales pour un contrôle personnalisé.



Figure 45 : Le synthétiseur Trinity V3 de Korg⁷².

Le Trinity est suivi par le Trinity V3 (voir Figure 45) qui ajoute 6 voix au puissant algorithme MOSS hérité du Z1, et conserve le générateur de son ACCESS du Trinity. L'ergonomie du Trinity V3, au niveau de l'édition des sons, est bien meilleure que celle du Prophecy.

5.1.8. Le sx-WSA1 de Technics

Le nom de la firme Technics est normalement associé à l'électronique de consommation. Le sx-WSA1 (voir Figure 46), commercialisé en 1995, constitue la première entrée de cette société dans le domaine des instruments professionnels, début remarquable en vérité. Deux modèles sont proposés, le sx-WSA1, synthétiseur avec clavier, et le sx-WSA1R, la version expandeur. Le sx-WSA1 offre 64 voix de polyphonie et possède 3 roues de modulation, une balle rotative de contrôle agissant sur deux paramètres à la fois, une interface graphique agréable et intuitive et 61 touches sensibles à la vélocité et à la rétroaction. Le clavier, non-lesté, ferme sans être dur, offre un toucher excellent.

⁷¹ Image « KorgTrinity.jpg » extraite de : <http://www.vanille.de/oasys.htm>

⁷² Image « Trinity-V3.jpg » extraite de : <http://www.harmony-central.com/Newp/SNAMM98/Korg/Trinity-V3.html>.



Figure 46 : Le synthétiseur sx-WSA1 de Technics⁷³.

La synthèse par modèles physiques utilisée par Technics ne constitue qu'un module de synthèse parmi d'autres, elle est appelée « Acoustic Modeling Synthesis ». Il s'agit en fait d'un système mixte utilisant des échantillons enregistrés (bruits, transitoires d'attaque) qui, ensuite, sont envoyés à travers des modèles de résonateurs simulés par les guides d'ondes. Cette architecture permet de travailler entre autres les modalités d'attaque par pincement et leur localisation ou encore d'adjoindre des sourdines... Ce principe est similaire au concept basic du Korg Wave Drum (voir § II.5.2.1) et du Roland VG-8 (voir § II.5.2.2) qui démarrent avec des formes d'ondes préexistantes alors que le VL1 modélise absolument tout, y compris la forme d'onde initiale. Cependant, le VG-8 et le Wave Drum commencent avec des formes d'ondes acoustiques, captées par micros qui ne peuvent pas être enregistrées par un séquenceur. Le WSA1, lui, commence avec des formes d'ondes échantillonnées qui peuvent être enregistrées.

Les résonateurs (cordes, tubes cylindriques ou coniques, cloches, plaques, membranes) sont modélisés par 4 guides d'ondes qui produisent le corps du son, la partie résonante. Des hybrides, entre attaques et résonateurs non assortis (attaque de trompette / résonateur cloche) sont possibles, et peuvent créer des sons inouïs intéressants, mais certaines associations ne donnent rien. La position d'attaque, le mouvement de l'excitateur, l'amplitude d'attaque, les modes de résonance, l'amortissement et l'enveloppe variant avec l'amplitude et la hauteur sont éditables et programmables de manière agréable, instinctive, et étonnamment simple. Des variations de brillance, de matériaux et de taille des instruments sont également possibles mais limitées par Technics car il est difficile de prévoir le résultat, parfois horrible, de ces manipulations. Des paramètres permettent de changer la position et les connexions des parties du modèle et les contrôleurs balles permettent de nombreux contrôles en temps réel. Ce synthétiseur est le seul qui permet

d'expérimenter directement l'association de diverses attaques associées à divers résonateurs, rendant possible la manipulation des caractéristiques de base du modèle. Les structures peuvent être associées pour, par exemple, simuler les résonances sympathiques. Chaque paramètre peut-être associé à un message MIDI particulier pour adapter le contrôle à ses besoins personnels. Le contrôle par l'intermédiaire de périphériques MIDI est simple et très efficace. Cependant le synthétiseur est prévu pour jouer au clavier et le jeu d'un instrument avec le contrôleur de souffle est difficile.

Une grande variété d'instruments est disponible, entre autres le tuba, rarement présent dans les synthétiseurs. Les sons d'usine sont excellents, cependant moins bons que ceux du VL1. Le reproche que l'on peut faire à ces sons est qu'ils sont trop léchés, donnant un aspect trop parfait qui manque de naturel.

Le grand nombre de résonateurs, d'excitations et de paramètres ouvre un immense champ d'exploration. Le sx-WSA1 est un bon compromis entre échantillonnage et modèles physiques. L'utilisation d'attaques échantillonnées réduit considérablement le coût en calcul, ce qui permet 64 voix de polyphonie et une grande variété de résonateurs. En comparaison, le VL1 qui modélise tout, y compris l'attaque, donne des sons de meilleure qualité mais limite sérieusement le nombre d'instruments, principalement des vents, et reste monophonique.

Chacun de ces synthétiseurs possède ses points forts, ils favorisent généralement une famille d'instruments donnée. Le VL1, par exemple, simule extrêmement bien les instruments à vent et tout particulièrement les anches simples, grâce à son ergonomie conçue pour tirer le meilleur parti d'un contrôleur de souffle.

Pour exploiter au mieux les modèles physiques, il paraît nécessaire d'utiliser une interface de contrôle la plus proche possible de l'instrument simulé et d'en jouer comme d'un instrument réel. Ceci implique un apprentissage des gestes, mais cela reste moins contraignant que l'apprentissage de l'instrument réel. En effet, une grande virtuosité peut-être obtenue en adaptant les doigtés à ses besoins personnels. La puissance de souffle nécessaire, dans le cas d'un instrument à vent, peut-être divisée par 10 (voir 100 ou plus

⁷³ Image « WSA.GIF » extraite de : <http://www.technics.com/SX-WSA1/SXWSA1.HTM>.

encore), pour permettre une aisance de jeu immédiate. Enfin, une même interface instrumentale permet de jouer toute une famille d'instrument.

L'idée d'un synthétiseur spécialisé pour une famille d'instrument en particulier, a donné naissance au Wave Drum de Korg et au VG-8 de Roland que nous allons décrire maintenant.

5.2. Modèles de synthétiseurs conçus pour une famille d'instruments en particulier : Le Wave Drum de Korg et le VG-8 de Roland

La spécialisation de ces synthétiseurs est à l'origine de leur succès. En effet, leur jouabilité a séduit immédiatement les instrumentistes. Et, même si cette machine ne s'adresse qu'à une catégorie restreinte d'utilisateurs, ceux-ci sont assez nombreux pour assurer son succès commercial. Les deux synthétiseurs présentés ont la particularité, comme nous l'avons expliqué au paragraphe II.5.1.8, d'utiliser des formes d'ondes acoustiques, captées par micros, comme point de départ d'une synthèse par modèles physiques basée sur les guides d'ondes.

5.2.1. Le Korg Wavedrum

Présenté sous la forme d'un kit de percussion, il ne fait que des percussions mais permet de sélectionner, modifier et créer ses propres sons. Des micros placés sur la peau des tambours permettent de capter les nuances des différentes techniques de jeu, y compris l'utilisation de balais. Les musiciens qui voudront créer des parties solo de batterie apprécieront l'extraordinaire quantité de timbres de percussions proposée par le Wave Drum. Malheureusement, comme les entrées (gestes déclenchant le son) sont acoustiques, le Wave Drum ne permet pas la communication en langage MIDI ce qui est un inconvénient durant l'enregistrement et l'édition.

Malgré ses qualités, cet appareil ne s'est pas bien vendu à cause de son prix et aussi à cause de la mentalité des batteurs qui préfèrent faire beaucoup de bruit en tapant sur une batterie traditionnelle plutôt que de passer du temps à explorer les possibilités sonores que le Wave Drum offre.

5.2.2. Le Roland VG-8

Le Roland VG-8⁷⁴ V-Guitar System (voir Figure 47) n'est qu'un processeur comme le Wave Drum mais il est extrêmement puissant, il permet de faire sonner une guitare ordinaire à la manière de n'importe quelle guitare de grand nom en modifiant ses caractéristiques. Il simule également la coloration de différents amplificateurs et placements de micros, ainsi que d'autres effets, donnant ainsi à la guitare une énorme palette de sons. L'utilisation du VG-8 nécessite une véritable guitare en entrée, équipée du microphone Roland GK-2A (voir Figure 48). VG8 n'a pas de générateur de son, GK2A prend la vibration de chaque corde séparément en temps réel. Ce son est la source : la corde est le générateur de son. Ainsi, il est possible d'utiliser une guitare aussi bien acoustique qu'électrique. Les musiciens utilisent généralement une guitare bas de gamme avec le VG-8 car cela ne semble pas modifier le son obtenu.



Figure 47 : Le VG-8 de Roland⁷⁵.

Le VG-8 ne comprend pas le langage MIDI mais il est possible de reproduire une exécution en utilisant une guitare MIDI en entrée. Le VG-8 est tout à fait différent d'un synthétiseur MIDI de guitare qui utilise les informations de hauteur et de volume pour piloter un générateur de son. Le VG-8 retravaille la forme d'onde elle-même : ceci est la clef de sa puissance d'expression. La transformation du son capté est effectuée en temps réel, sans aucun retard, ce qui permet une parfaite conservation de toute la finesse du jeu. Des effets de polyphonie⁷⁶ sont possibles en captant séparément le son de chaque corde (en y associant un timbre différent, par exemple). Le réglage de l'accord est séparé pour chaque

⁷⁴ Des sons réalisés par le VG8 sont proposés sur le disque d'exemples sonores (voir Annexe 2 § 7, CD2 page 21 à CD2 page 30).

⁷⁵ Image « VG-8EX.jpg » extraite de : http://www.rolandus.com/PRODUCTS/MI/MI_GP.HTM.

⁷⁶ A titre d'exemples, nous pouvons écouter un son du VG8, proposé sur le disque d'exemples sonores : son de guitare à douze cordes (voir Annexe 2 § 7, CD2 page 22).

corde, ce qui permet de changer la hauteur des cordes à vide sans réaccorder la guitare. Le son de chaque corde peut-être positionné dans l'espace pour obtenir un fondu global ou un positionnement net du son de chaque corde.

Le VL1, contrairement au VG-8, ne peut modéliser l'arpègement typique des cordes de guitare ou les résonances sympathiques. Bien sûr, il existe le DIGITAR, un petit accessoire qui permet, quand on plaque un accord sur un clavier, de l'arpéger en grattant le DIGITAR qui produit un fichier MIDI. Le DIGITAR a ses adhérents et il dispense d'apprendre les doigtés de guitare, mais il est difficile de croire que les musiciens seront attirés par cette façon de jouer.

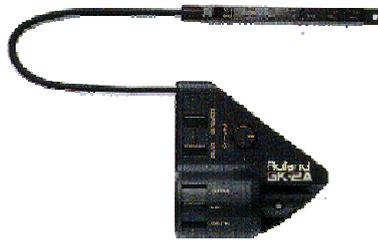


Figure 48 : Le microphone GK2A de Roland qu'il est possible d'utilisé avec le processeur VG-8⁷⁷.

VG8 utilise la technologie COSM (Composite Object Sound Modeling), ainsi nommée par la société Roland. Il s'agit d'une méthode associant deux types de modélisation physique pour façonner le son : la technique VGM et la technique HRM. La technique VGM (Variable Guitar Modeling) permet, à partir du son classique de la guitare, de remodeler les différentes composantes du son. Elle est ainsi en mesure de simuler le son de n'importe quelle guitare⁷⁸, associée à n'importe quel amplificateur, n'importe quels haut-parleurs, et n'importe quel microphone, et ceci, quel que soit l'instrument ou ampli utilisé. De plus, il est possible de modéliser les différents placements des haut-parleurs et la position du microphone. La technique HRM (Harmonic Restructure Modeling) permet de créer des sons totalement nouveaux, tout en conservant l'expressivité de la guitare qui reste le générateur du son. Dans cette technique, la forme d'onde est isolée ; puis les harmoniques ou partiels du son sont amplifiés ou atténués de manière à modifier

⁷⁷ Image « vg8-gk.gif » extraite de : <http://www.musical-sounds.de/gitarre/roland/vg8.html>.

⁷⁸ Différents sons de guitare réalisés par le VG8 sont proposés sur le disque d'exemples sonores (voir Annexe 2 § 7, CD2 page 21 à CD2 page 30)

totallement le timbre⁷⁹. Ainsi on obtient des sons totalement nouveaux comme l'orgue, le clavecin, etc.

VG8 offre une interface avec des icônes, soutenu par un grand écran éclairé, qui rend la sélection et la configuration du son, facile et intuitive. Les touches ont une ergonomie de pédales pour être actionnées au pied comme des pédales d'effets.

Le VG-8 a fait l'objet de critiques élogieuses de la part des guitaristes qui l'utilisent. Il semble qu'il se soit fait une belle place sur le marché, et ceci en dépit de son prix élevé. Ainsi, Roland a proposé de nombreux enrichissements en sons et effets pour le VG-8.

⁷⁹ A titre d'exemples, nous pouvons écouter un son du VG8, proposé sur le disque d'exemples sonores : imitation d'un orgue par la guitare (voir Annexe 2 § 7, CD2 page 30).

5.3. Conclusion

Pour utiliser au mieux les qualités de la synthèse par modèles physiques, il est nécessaire d'utiliser des contrôleurs proches des modèles instrumentaux. Transformer les données de souffle en attaques de cordes pincées, permet d'obtenir tout sauf un son de corde pincée réaliste. Evidemment l'intérêt des modèles physiques est de créer des sons inouïs, extensions d'instruments réels ou sons nouveaux. Mais, n'oublions pas que le succès des synthétiseurs auprès du grand public tient à ce rêve démagogique de pouvoir jouer n'importe quel instrument sans avoir jamais appris. La qualité sonore découle en partie de la modélisation parfaite des techniques de jeu, cela constitue un écueil qui sépare les amateurs des musiciens avertis, et risque d'entraîner la désaffection du grand public vis à vis de ces machines. Il y a un retour à l'apprentissage, un retour à une pratique « instrumentale », d'où l'importance de l'ergonomie. La synthèse physique induit la disparition de ce rêve démagogique, et limite l'accès à ces machines aux instrumentistes avertis. Cependant l'apprentissage est plus rapide que pour les instruments acoustiques et porte sur toute une famille d'instruments. Par exemple, un instrument à vent unique permet de contrôler toutes les anches simples, doubles et biseaux avec un doigté unique pour tous et adapté à ses goûts et de jouer du saxo avec aussi peu de souffle qu'une flûte à bec soprano. La qualité de l'interface gestuelle utilisée transparaît dans sa jouabilité et sa facilité d'utilisation.

La qualité du synthétiseur apparaît dans la facilité avec laquelle on peut éditer les sons, et dans la liberté offerte pour modifier ceux-ci et créer d'autres instruments en assemblant des structures dont on définit les caractéristiques. La quantité de sons et leur diversité est également un critère qui motive l'achat d'un synthétiseur. L'intérêt majeur est ici de fournir des sons inouïs qui sonnent « acoustiques » et que l'on peut contrôler pour une exécution expressive avec un apprentissage inférieur à celui nécessaire pour jouer un instrument acoustique. On aboutit à une simplicité maximale d'utilisation avec une exploitation maximale de toutes les capacités de cette synthèse. Le défauts de ces synthétiseurs est de présenter une ergonomie classique avec un clavier, ce qui n'attire pas les instrumentistes à vent, et de nécessiter un contrôleur de souffle, ce qui rebute les clavieristes. Ainsi ces synthétiseurs essaient de satisfaire tous les utilisateurs sans en enthousiasmer aucun. Le succès du VG8 provient du fait qu'il est dédié à un groupe

d'instrumentistes, les guitaristes, et qu'il prend soin de ne pas les dépayser en leur permettant d'utiliser un instrument réel - et pourquoi pas l'instrument auquel ils sont tous particulièrement habitués - pour synthétiser toute une gamme de timbres. Le clavier ne peut convenir qu'au contrôle des clavecins, orgues, épinettes, pianos... Utiliser un clavier pour jouer d'autres instruments, c'est perdre ce que la synthèse physique apporte. Il semble donc que les machines dédiées à une famille d'instruments et utilisant des contrôleurs proches des instruments acoustiques sont les seules à pouvoir allier la qualité à la facilité d'utilisation et au succès commercial.

III. LA CREATION ARTISTIQUE AUTOUR DES MODELES PHYSIQUES

Malgré leur diversité, toutes les techniques de synthèse par modèles physiques offrent les mêmes avantages et posent des problèmes similaires lors de leur mise en pratique. Dans cette partie nous nous attacherons à la critique de la technique des modèles physiques en général. Toutes les problématiques abordées seront illustrées par des références aux œuvres proposées sur les deux disques d'exemples.

1. Modèle de signal et modèle physique

Comme nous l'avons précisé précédemment, la synthèse par modèles physiques se distingue par le fait qu'elle s'attache à construire un objet sonore et non un son. Ainsi, les paramètres mis en jeu dans le processus de synthèse sont totalement différents :

« Chaque objet vibrant offre un certain nombre de paramètres que l'on fixe à la valeur de son choix. Chacun d'eux a une incidence sur la nature du son. Contrairement aux modes de synthèse sonore ou l'on met en œuvre directement les paramètres sonores, la variation d'une valeur d'un paramètre physique pourra avoir sur le son des conséquences multiples agissant simultanément sur la hauteur, la durée, et le timbre. Le réglage en est donc assez délicat, d'autant plus qu'il est possible que certaines valeurs soient incompatibles avec d'autres⁸⁰. »

Ainsi, la synthèse par modèles physiques change les habitudes du musicien habitué à utiliser la synthèse sonore par ordinateur. Celui-ci va devoir apprendre à manipuler des valeurs physiques qui sont à la fois plus distantes du son et plus proches de ses habitudes musicales.

« L'utilisateur, sauf cas particuliers, ne spécifie pas dans sa programmation les hauteurs de chaque mode et les temps

⁸⁰ G. Loizillon, *Modes de description des sons et synthèse sonore*, thèse de doctorat, Université de Paris VIII, 1995-96, p. 253.

d'extinction, mais programme les paramètres et les dimensions physiques d'un objet ainsi que les forces d'excitation qui seront traduites par le calcul, sur le plan sonore. On voit bien ici la grande différence de ce mode de synthèse avec tous ceux issus des modèles de signal. Le travail de l'imaginaire ne s'effectue pas ici sur une pensée sonore mais plutôt sur une virtualisation du geste instrumental⁸¹. »

Le son n'est plus envisagé comme un processus allant du simple au complexe, il est issu du modèle et constitue une entité complexe indépendamment de la complexité du modèle qui l'a généré. Les paramètres ne sont plus indépendants les uns des autres et leur spécification ne s'accompagne pas de la description point par point du parcours du son dans le temps, comme c'était le cas dans le cadre de la synthèse par modèle de signal. La synthèse par modèles physiques permet, non pas de spécifier les aspects du son en terme de paramètres physiques mais de mettre en œuvre un processus événementiel imaginaire⁸², dont on écouterait l'aspect sonore.

« Les éléments qui, dans la synthèse par modèle de signal, sont explicitement spécifiés (fréquence, durée, profil dynamique) deviennent en synthèse par modèles physiques, des conséquences de la spécification de la forme et de la matière des objets et des modes d'interactions entre ceux-ci. Nous sommes en ce sens, réellement placés dans certaines des conditions instrumentales ; celle de l'exploration des capacités sonores d'un dispositif mécanique⁸³. »

Etant donné que le processus semble le même pour toutes les formes de synthèse par modèles physiques, il paraît étrange de constater la présence d'un si grand nombre de techniques différentes. Il faut savoir premièrement que le formalisme de chaque technique n'est pas le même. La technique de Hiller et Ruiz utilise une description du modèle en termes de masses et de ressorts, ce qui est très coûteux en temps de calcul. Le formalisme modal apporte une réponse satisfaisante à ce problème. Cordis-Anima et Mosalys sont les deux exemples les plus aboutis de cette technique modale. Cependant, si Cordis s'inscrit dans un cadre multimédia, c'est à dire avec un retour visuel nommé Anima, et décrit le

⁸¹ G. Loizillon, *Modes de description des sons et synthèse sonore*, thèse de doctorat, Université de Paris VIII, 1995-96, p. 252.

⁸² A titre d'exemples, nous pouvons écouter un son synthétisé par Guillaume Loizillon grâce à Modalys et mettant en œuvre un phénomène de rebond. Ce son figure sur le disque d'exemples sonores : phénomène de rebond, masse lâchée au dessus d'une plaque (voir Annexe 2 §2, CD1 Plaque 16).

⁸³ G. Loizillon, *op. cit.*, p. 284.

modèle en terme d'atomes, Mosalys lui est conçu dans un but purement musical et permet d'assembler des éléments plus complexes comme un tuyau, une plaque ou une anche. Ce qui fait la particularité de la méthode des guides d'ondes, c'est la simplicité de ses algorithmes utilisant le principe des tables d'ondes et leur économie en terme de puissance machine. Deuxièmement, ces techniques, avant d'être généralisées à toutes sortes d'instruments, ont toutes été développées dans le but de synthétiser une certaine variété de timbres. Par exemple le formalisme des guides d'ondes provient de l'algorithme de Karplus et Strong conçu pour synthétiser les sons de cordes pincées.

« Après une période de recherche avec les trois techniques : additive, soustractive et modulation de fréquence, on en est venu à penser qu'une synthèse fine aux visées mimétiques ou plus abstraites nécessitait une approche plus réduite ; C'est pourquoi, dans les années 60 et 70, de nouvelles techniques spécifiques sont apparues pour synthétiser un type de son. Cette façon de traiter chaque problème acoustique et psychoacoustique comme un cas particulier se pratique encore actuellement.⁸⁴ »

Cependant, les concepteurs des techniques ainsi que leurs utilisateurs ne peuvent se résoudre à utiliser une technique différente pour chaque type de son désiré. En effet, seule une technique générale comme Modalys peut permettre de créer des hybrides entre deux éléments aussi différents qu'un gong et une flûte.

« La difficulté fondamentale de la synthèse numérique consiste à trouver le plus petit éventail de techniques couvrant la gamme des sons musicalement désirables de la façon la moins redondante possible⁸⁵. »

Quand les concepteurs s'attachent à créer des techniques plus générales et malgré cela satisfaisante en ce qui concerne la qualité du son, le problème de l'économie réapparaît :

« La construction d'un modèle physique est en général une entreprise longue et délicate en dépit des outils modulaires et assez généraux qui commencent à apparaître. De même le coût de calcul

⁸⁴ M. Laliberté, « Informatique musicale : utopies et réalités », dans *Utopies, cahier de l'Ircam n°4*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, 1993, p. 168.

⁸⁵ J. O. Smith, « Observations sur l'histoire de la synthèse numérique du son » dans *la synthèse sonore, cahier de l'Ircam n°2*, collection recherche et musique, édition Ircam, centre George Pompidou, Paris, 1996, p. 84. (traduction de l'anglais par Jacqueline Henry)

*est plus difficile à maintenir dans certaines limites, alors que c'est un aspect très bien contrôlé dans un modèle de signal*⁸⁶. »

En effet, le coût de calcul est un handicap de la synthèse par modèles physiques. Le compositeur François Nicolas semble ne pas avoir apprécié pleinement Mosaïc à cause de cet inconvénient⁸⁷. Pour obtenir un coût raisonnable des algorithmes en puissance machine, il faut opérer des simplifications qui permettent néanmoins des résultats étonnant d'authenticité.

*« L'algorithme de Karplus-Strong a montré, à la surprise générale, que le modèle physique d'une vraie corde vibrante pouvait être ramené à une moyenne sur deux points sans multiplication tout en donnant des résultats musicalement utiles.*⁸⁸ »

Si la synthèse par modèles physiques est gourmande, elle est cependant, à qualité égale, plus économique que les techniques par modèle de signal.

*« Il faut beaucoup de mémoire pour réaliser un espace de timbre multidimensionnel à l'aide de tables, un modèle physique vaut peut-être mille tables d'ondes*⁸⁹. »

Evidemment, cette économie n'est pas le seul critère qui explique l'utilité de cette technique. Nous allons donc discuter maintenant, à travers les opinions de différents compositeurs, de la légitimité de cette synthèse par modèles physiques.

⁸⁶ X. Rodet, P. Depalle, G. Fleury, F. Lazarus, « Modèles de signaux et modèles physiques d'instruments : études et comparaisons » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, Paris, 1994, vol. II p. 362.

⁸⁷ Dans son œuvre *Dans la distance*, François Nicolas a préféré utiliser les sons de Mosaïc comme base pour une synthèse granulaire et n'utilise que très peu de sons directement issus de la synthèse (voir Annexe 2 § 4, CD1 Plage 27 : œuvre complète. CD1 Plage 28 : partie électroacoustique).

⁸⁸ J. O. Smith, « Observations sur l'histoire de la synthèse numérique du son » dans *la synthèse sonore, cahier de l'Ircam n°2*, collection recherche et musique, édition Ircam, centre George Pompidou, Paris, 1996, p. 91. (traduction de l'anglais par Jacqueline Henry)

⁸⁹ J. O. Smith, *op. cit.*, p. 88.

2. La légitimité de la synthèse par modèles physiques

Lors du colloque qui c'est tenu à Grenoble en 1990, Jean-Claude Risset et Claude Cadoz ont soulevé, tous deux, le problème de la légitimité de cette synthèse : a-t-elle finalement, vraiment lieu d'être, apporte-t-elle quelque chose de plus que les modèles de signaux ? La particularité première de la synthèse par modèles physiques réside dans le fait qu'elle s'attache à modéliser, non pas le son lui-même, mais l'objet sonore qui doit le produire. En cela, cette technique est totalement différente des méthodes traditionnelles de synthèse par modèle de signal.

« L'observation, l'analyse et la reconstruction, visent l'essence de l'objet qui produit les conditions de la production, plus que ce qui est produit. C'est par l'évolution de la puissance des machines que ce déplacement est progressivement devenu possible : remonter d'un niveau dans la recherche et la formalisation des effets, on se déplace en amont vers une représentation et une restitution des causes⁹⁰. »

D'après Claude Cadoz, ce « déplacement » semble être un développement, une amélioration des techniques, mais cette représentation des causes plutôt que des effets constitue-t-elle un progrès ? Jean-Claude Risset ne trouve pas cette évolution convaincante :

« La musique est faite pour être entendue, et a priori les modèles physiques ne sont pas spécialement pertinents parce que ce qui compte n'est pas le processus de production mais la perception, l'effet sur les sens, la sanction phénoménologique. Avec la synthèse par ordinateur, on cherche à dépasser les limitations des systèmes mécaniques. Aussi, à première vue, utiliser l'ordinateur pour mettre en œuvre des modèles physiques peut sembler entrer dans l'avenir à reculons, comme disait Mac Luhan, puisque c'est chercher à reproduire ce qui existe déjà dans le monde acoustique⁹¹. »

⁹⁰ C. Cadoz, « Modèle physique, création musicale et ordinateur » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, Paris, 1994, vol. III, p. 7.

⁹¹ J.-C. Risset, « Modèles physiques et perception - modèles physiques et composition » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, Paris, 1994, vol. III, p. 713.

Cette façon de procéder semble, en effet, en contradiction directe avec le rêve romantique d'une virtuosité échappant à la nature physique de l'instrument : comment défier les lois de la physique quand on s'attache à les recréer ? David Wessel au CNMAT⁹² de l'université de Berkeley en Californie, en accord avec cette remarque, désapprouve l'approche de la synthèse par modèles physiques. Il demande « Why tie yourself to the physical world ? art is about making artifacts, it's about the new⁹³ ». Et Jean-Claude Risset renchérit :

« The point of physical systems, it seems to me, is that they create a world of sound that is virtual and illusory, but where the parameters of control are the parameters of the physical world. But they are not acoustic parameters and it's very hard to do things like paradoxes or illusions, because these are things that do not exist in the physical world. You can't explore the whole world of sound with physical models⁹⁴. »

La formation de modèles limités au cadre du monde physique - c'est un caractère propre à la méthode - consiste en une reproduction instrumentale. Pourquoi un retour à l'instrument, sans instruments ? Jean Claude Risset et Guillaume Loizillon nous donnent des éléments de réponse :

« Les modèles physiques ont une justification du point de vue perceptif, parce qu'ils aident à comprendre nombre de mécanismes fondamentaux qui demeurent le substrat de notre perception⁹⁵ ».

« Ce type de synthèse sonore présente l'avantage de considérer comme point de départ l'importance du rapport culturel entre l'écoute et l'objet, source du son⁹⁶. »

⁹² Center for Music and Audio Technology

⁹³ Propos de David Wessel, cités dans J. Chabade, *Electric sound*, 1996.

Je traduis : « pourquoi se raccrocher au monde physique ? L'art a pour but de créer des artefacts, du nouveau. »

⁹⁴ Propos de Jean Claude Risset, cités dans J. Chabade, *Electric sound*, 1996.

Je traduis : « L'important, en ce qui concerne ces systèmes physiques, il me semble, c'est qu'ils créent un monde de sons qui est virtuel et illusoire, mais où les paramètres de contrôle sont les paramètres du monde physique. Cependant, ce ne sont pas des paramètres acoustiques, et il est très difficile de réaliser des choses comme les paradoxes ou les illusions, parce que ces choses n'existent pas dans le monde physique. Avec les modèles physiques, vous ne pouvez pas explorer le monde sonore dans sa totalité. »

⁹⁵ J.-C. Risset, « Modèles physiques et perception - modèles physiques et composition » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. III, p. 713.

⁹⁶ G. Loizillon, *Modes de description des sons et synthèse sonore*, thèse de doctorat, Université de Paris VIII, 1995-96, p. 251.

La restitution des contraintes physiques, voire instrumentales, restreint le nombre de sonorités possibles en privilégiant celles que l'on peut rattacher à une origine mécanique. Cela semble plutôt être une bonne chose, car cela flatte notre penchant naturel à associer le son à un événement⁹⁷.

« L'expérience de la synthèse musicale, depuis les premières expérimentations de la musique électronique, a démontré que les sons de provenance naturelle étaient d'un intérêt bien supérieur aux sons produits par des modèles mathématiques trop élémentaires : tromper l'oreille sur la provenance des sons est difficile. Les paramètres d'un modèle physique ont des possibilités d'évolutions contraintes par le modèle, et donc semblent susceptibles de délivrer d'emblée des objets sonores plus conformes à notre expérience et par suite plus acceptables : on peut espérer que les évolutions de paramètres acoustiques obtenues par un tel synthétiseur soient automatiquement des évolutions plausibles en faisant l'économie de les spécifier explicitement⁹⁸. »

Les sons obtenus par modélisation physique ont donc une justification perceptive, due à la qualité sonore qui découle de leur aspect familier. Ils ont « plus de relief et une identité beaucoup plus marquée⁹⁹ ».

« Ce mode de fonctionnement joue un rôle déterminant pour l'organisation perceptive. Il détermine les corrélats de l'intensité et de la distance à la source. Pour agencer une composition musicale - surtout recourant à des sons "artificiels", dont on sait mal a priori comment ils sont perçus et comment ils se combinent - il est essentiel de comprendre comment l'audition organise le complexe sonore qui lui parvient, comment elle y distingue des "voix", des "images", comment elle sépare ou regroupe les différents éléments constitutifs.

On voit l'utilité des modèles physiques pour éclairer ces notions : la psychologie écologique suppose le développement d'une physique du perceptible. L'enjeu pour maîtriser les problèmes compositionnels est le plus crucial lorsque la composition recourt à des synthèses fondées sur des éléments

⁹⁷ Le fait que les sons d'origine électronique, sans référence à une origine mécanique, aient souvent servi d'illustration au cinéma fantastique, ou à la science fiction, c'est à dire à l'illustration d'événements qui échappent à la réalité, est révélateur. Bon nombre d'auditeurs non habitués qualifient encore ces sons de « bizarres ».

⁹⁸ C. d'Alessandro, D. Beautemps, « Représentation, modification et synthèse du signal vocal par formes d'ondes élémentaires » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. I p. 253.

*acoustiques arbitrairement calculés. Ainsi, paradoxalement l'importance des modèles physiques n'apparaît jamais autant que lorsqu'on utilise les ressources de l'électricité et de l'informatique pour échapper aux contraintes mécaniques de la production du son.*⁹⁹ »

La technique des modèles physiques amène à une prise de conscience de l'importance pour la perception de la reconnaissance d'une causalité. François Nicolas affirme¹⁰⁰ qu'il a été attiré vers la synthèse physique car il trouvait les sons produits intéressants perceptuellement et plus musicaux, abstraction faite des problèmes de temps réel et de lourdeur des calculs. David Jaffe explique la qualité de ces sons dans les mêmes termes que J.-C. Risset, ils ont d'après lui « just the right degree of 'robustness of identity'¹⁰¹ ». Pour lui, la possibilité de changer radicalement les paramètres des modèles et d'obtenir une large palette de sons qui restent toujours perceptiblement proches est l'intérêt majeur de cette synthèse¹⁰² :

« I use this technique to abstract from the "known" towards the "unknown". That is, I think of a real instrument, then think of what would be difficult or impossible for it to do (either in an ensemble sense, or an acoustic sense), and then use that as a starting point for my compositions¹⁰³. »

Kaija Saariaho qui est très intéressée par une « extension du timbre comme prolongement des instruments acoustiques et globalisation des phénomènes sonores¹⁰⁴ », utilise de même des « sons dérivés de modèles instrumentaux », avec lesquels elle « cherche des comportements simplement différents de leur utilisation normale ». Dans

⁹⁹ J.-C. Risset, « Modèles physiques et perception - modèles physiques et composition » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. III, p. 711.

¹⁰⁰ Voir § 1 Entretien avec François Nicolas, en annexe 1.

¹⁰¹ Voir § 3 Courriers de David Jaffe, en annexe 1.

Je traduis : « juste le bon degré de robustesse au niveau de leur identité ».

¹⁰² A titre d'exemples, nous pouvons écouter *Silicon Valley Breakdown* de David Jaffe où de très nombreuses sonorités de cordes pincées sont obtenues par modification d'un algorithme de synthèse par guides d'ondes. Cette œuvre figure sur le disque d'exemples sonores (voir Annexe 2 § 8.3, CD2 page 33).

¹⁰³ Voir § 3 Courriers de David Jaffe, en annexe 1.

Je traduis : « J'utilise cette technique pour progresser dans l'abstraction du "connu" vers "l'inconnu". De là, je pense à un instrument réel, puis à ce qui lui serait difficile voir impossible de faire (autant au niveau de l'exécution qu'au niveau acoustique), alors j'utilise ceci comme point de départ pour mes compositions. »

¹⁰⁴ Cette citation et les suivantes sont extraites de : Danielle Cohen Levinas, « Entretien avec Kaija Saariaho », *la synthèse sonore, cahier de l'Ircam n°2*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, 1993, p. 13-41.

*Amers*¹⁰⁵, par exemple, elle utilise une sonorité de gong, à laquelle elle applique la notion de glissando. Ces deux objets sonores connus et inconciliables dans le monde réel, sont ici associés et compris par l'oreille. Elle a réalisé ces sons de percussion avec Mosaïc car ce logiciel permet des « attaques très vivantes dues à l'aspect particulièrement réaliste de la simulation des transitoires d'attaque ». Un aspect, de cette technique, particulièrement fertile mais difficile est pour elle le contrôle des paramètres. Le travail réalisé dans ce domaine permet de prendre conscience des interactions sous-jacentes du jeu intuitif d'un musicien.

¹⁰⁵ *Amers* de Kaija Saariaho figure sur le disque d'exemples sonores (voir Annexe 2 § 3, CD1 Plage 26).

3. Objet sonore / Événement sonore

L'accès des compositeurs aux modèles physiques est encore trop récent et trop restreint, pour pouvoir en établir les conséquences sur la pratique de la composition. Cependant, il est à remarquer que la synthèse par modèles physiques bouleverse notre rapport au son. En effet, les années de pratique de la musique électroacoustique - que nous soyons amenés à utiliser des sons concrets ou synthétiques - nous ont habitué à abstraire le son de toute origine mécanique et à le considérer comme un objet autonome. En restituant une dimension causale, les modèles physiques nous amènent à reconsidérer profondément l'ensemble de nos habitudes. Guillaume Loizillon met en avant, dans sa thèse¹⁰⁶, le fait que ce changement se traduit par l'opposition des conceptions de « son objet » et de « son événement ». En effet, au concept de « l'objet sonore » défendu par Pierre Schaeffer dans son *Traité des objets musicaux* s'oppose une vision événementielle du son exposée par Roberto Casati et Jérôme Dokic :

« La présence d'un son témoigne de la présence d'un événement. L'aspect dynamique du monde fait ainsi son apparition dans la perception auditive. Mais il est clair que le lien entre les sons et les événements est fort étroit, et sans doute plus étroit qu'un simple lien de témoignage ; suivant la thèse que nous voulons défendre, les sons sont des événements¹⁰⁷. »

Nous remarquons alors, que la conception de « l'objet sonore » correspond tout à fait à la démarche des synthèses par modèle de signal, alors que les synthèses par modèles physiques se rattachent à cette notion de « son événement ». Cette possibilité qui nous est offerte de pouvoir assimiler le son à quelque chose de familier, de le comprendre en terme d'effet d'un événement mécanique, semble donner à cette technique de synthèse une simplicité et une facilité d'approche toute particulière. La mise en jeu d'un savoir instinctif que nous avons du monde sonore réel devrait suffire à justifier l'intérêt de cette méthode, mais s'agit-il réellement d'un savoir instinctif ?

¹⁰⁶ G. Loizillon, *Modes de description des sons et synthèse sonore*, thèse de doctorat, Université de Paris VIII, 1995-96, p. 280-284.

¹⁰⁷ R. Casati et J. Dokic, *la philosophie du son*, Nîmes, édition Jacqueline Chambon, 1994, cité par G. Loizillon, dans *Modes de description des sons et synthèse sonore*, thèse de doctorat, Université de Paris VIII, 1995-96, p. 251.

4. Un savoir instinctif ?

Jean-Claude Risset insiste, nous l'avons dit, sur le fait qu'à première vue, la technique des modèles physiques n'apporte rien, au niveau musical, à la synthèse sonore. « Ne suffit-il pas de simuler le résultat avec l'oreille pour critère ?¹⁰⁸ » s'exclame-t-il. Il est évident que l'intérêt musical du son synthétisé est le premier souci des compositeurs et leur inquiétude face aux innovations des techniciens est légitime : ne sont-ils pas sur le point d'oublier le but de leur recherche qui est de créer des sons musicaux ?

En fait, créer des sons « avec l'oreille pour critère » n'est pas une chose aisée. La synthèse qu'elle soit analogique ou numérique est exécutée par une machine à laquelle il faudra fournir des données. Ces données sont des informations chiffrées car la machine ne peut en aucun cas comprendre des ordres subjectifs. Le problème est donc clair : notre oreille aura beau percevoir les défauts d'un son, elle ne nous aidera pas à gouverner la machine pour obtenir d'elle un résultat plus satisfaisant. La manière la plus simple pour obtenir de la machine les sons désirés est de tirer parti de la technologie des instruments classiques ou des sons naturels. C'est là que l'apport de la synthèse par modèles physiques est considérable. Le modèle physique va permettre de simuler les caractéristiques de l'instrument qui sont déterminantes pour la production du son. Les différents critères physiques de l'instrument sont toujours définis par des chiffres (longueur d'une corde, élasticité de celle-ci...), mais ceux-ci correspondent à des valeurs plus concrètes ; le contrôle des paramètres est ainsi plus intuitif. De plus, les critères signifiants du générateur correspondent à ceux des sons. Ce système tire parti du savoir instinctif que le musicien a de l'instrument et lui offre des outils simples pour contrôler et produire des sonorités autant traditionnelles qu'entièrement nouvelles.

Cependant, il est révélateur de constater que les compositeurs qui trouvent ce principe instinctif sont également chercheurs dans ce domaine, je pense par exemple à David Jaffe. Les compositeurs qui utilisent ce principe sans avoir, au préalable, de connaissances importantes dans ce domaine, ne tiennent pas le même discours. Par exemple, Kaija Saariaho met en avant le fait que :

¹⁰⁸ J.-C. Risset, « Modèles physiques et perception - modèles physiques et composition » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990,*

« La référence directe à l'univers physique peut aussi se révéler illusoire : un compositeur n'a pas forcément d'idée sur la manière de décrire physiquement une situation de production instrumentale. Il ignore à coup sûr la densité d'une corde ou le poids d'une caisse de violoncelle¹⁰⁹. »

X. Rodet, P. Depalle, G. Fleury et F. Lazarus, ne sont pas tout à fait du même avis :

« Dans le cas du modèle physique, certains paramètres peuvent être un peu difficiles à concevoir pour l'utilisateur, tel le module de Young d'une corde. Cela ne veut pas dire cependant que l'apprentissage par l'utilisateur ne puisse pas être assez rapide. Mais au départ, l'intuition est de peu d'aide. D'autres paramètres en revanche ont une pertinence immédiate dans le cadre du geste instrumental telle la force ou la vitesse d'un marteau¹¹⁰. »

La mesure sur des instruments réels permet de remédier au problème de la spécification des paramètres du modèle. Les données décrivant ce dernier sont suffisamment parlantes pour l'utilisateur, pour lui permettre, ensuite, de jouer avec ces valeurs en vue de modifier le modèle. Un problème intervient néanmoins lorsque l'utilisateur ne commence pas son travail par la modélisation d'un instrument réel qu'il va ensuite déformer, mais par un instrument chimérique. Dans ce cas, les mesures sur des instruments réels ne sont d'aucune aide. De plus, l'observation du jeu d'un instrument réel est sujette à un autre inconvénient :

« L'autre difficulté est la mesure de certains paramètres pendant le jeu instrumental. A titre d'exemple, il ne paraît pas très simple de mesurer la masse, les coefficients de viscosité et de raideur de la lèvres du trompettiste pendant le jeu¹¹¹. »

Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. III, p. 719.

¹⁰⁹ D. Cohen-Levinas, « Entretien avec Kaija Saariaho », *la synthèse sonore, cahier de l'Ircam n°2*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, 1993, p. 34.

¹¹⁰ X. Rodet, P. Depalle, G. Fleury, F. Lazarus, « Modèles de signaux et modèles physiques d'instruments : études et comparaisons » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. II p. 359.

¹¹¹ X. Rodet, P. Depalle, G. Fleury, F. Lazarus, *op. cit.*, vol. II p. 363.

5. Analyse des sons pour extraire des modèles de synthèse physique

Pour le contrôle des modèles, il est possible d'acquérir les valeurs des paramètres à partir de mesures effectuées sur les instruments. Mais, dans le cas d'instruments fragiles ou de la voix, les mesures possibles sont limitées, certaines étant tout à fait impossibles dans l'état actuel des techniques. Un moyen permettant d'extraire les données du son lui-même serait la solution la plus efficace et la plus générale.

Cependant, pour l'instant, il n'existe aucune technique d'analyse qui permette à partir d'un son quelconque d'extraire les paramètres physiques permettant de modéliser la source qui l'a produit. Néanmoins, dans le cadre de Cordis-Anima, il a été développé un outil d'analyse¹¹² qui permet, à partir d'un geste donné et de la réaction correspondante de la structure vibrante, de déduire la composition de cette dernière, en termes de masses et de ressorts.

Pour déduire de l'analyse d'un son les paramètres physiques de la structure le générant, il est, pour l'instant, nécessaire d'utiliser des filtres Kalman, outil d'analyse qui repose à la fois sur la théorie des signaux et sur la représentation en variables d'états, et qui permet d'identifier l'état d'un système dans un contexte non stationnaire et avec une entrée déterministe. Les filtres de Kalman sont supérieurs aux méthodes de prédiction linéaire, mais ne sont efficaces qu'avec une modélisation fondée sur le formalisme en variables d'état. Or aucune des synthèses que nous avons évoquées n'utilise ce formalisme. De nombreuses recherches à l'IRCAM sont poursuivies dans le but de développer une écriture des modèles physiques basée sur ce formalisme largement utilisé dans le domaine de l'automatique, ce qui permettrait d'utiliser le filtrage de Kalman comme procédé d'analyse. Jusqu'à présent, les tubes (linéaires) des instruments à vent ont été décrits d'une manière physiquement et perceptiblement satisfaisante, en prenant en compte les pertes viscothermiques au cours de la propagation des ondes sonores dans l'air. Après une modélisation simplifiée du rayonnement, ces modèles seront reliés à des excitateurs non-linéaires permettant de simuler les sources. A partir de ces travaux théoriques, un

¹¹² C. Cadoz, N. Szilas, « Physical Models that learn », in *Proceedings of the International Computer Music Conference*, San Francisco, International Computer Music Association, 1993, p. 72-75.

environnement informatique capable de créer automatiquement un synthétiseur¹¹³ donné à partir de la géométrie d'un système de tubes interconnectés, est actuellement mis au point.

« Nous voulons souligner l'importance du choix du modèle pour une technique de synthèse. En particulier une des qualités que doit avoir le modèle est qu'il doit bien se prêter à une acquisition automatique des évolutions de ses paramètres à partir d'une ou plusieurs de ses sorties. En ce sens, les modèles en variables d'état semblent intéressants parce qu'ils constituent un intermédiaire entre les modèles de signaux et les modèles physiques ce qui autorise un transfert de connaissance de l'une des approches vers l'autre¹¹⁴. »

Pour l'instant, l'absence d'une méthode d'analyse rend l'utilisation de la synthèse par modèles physiques problématique et contraignante. Le compositeur se trouve face à deux interdictions fondamentales. D'une part, il ne peut associer directement à un son donné un ensemble de paramètres, ce qui l'empêche de prédire le résultat sonore correspondant à la manipulation des paramètres de contrôle ; sans notion d'acoustique approfondie et de pratique instrumentale, le compositeur sera contraint de procéder à de nombreuses expériences. D'autre part, l'absence d'analyse interdit toute transformation du son d'un instrument réel par l'intermédiaire d'une analyse-resynthèse. Ce serait pourtant très intéressant : on assisterait à une mutation sonore mais surtout à une mutation de l'instrument lui-même.

La possibilité d'associer une méthode d'analyse à une synthèse et par voie de conséquence, transformer un son instrumental, reste le propre des synthèses par modèles de signaux. Les utilisateurs de la synthèse par modèles physiques s'attachent donc à reproduire des instruments connus afin d'apprendre à maîtriser ces paramètres.

¹¹³ Chaque modèle se réalise concrètement sous la forme d'un programme, appelé synthétiseur, qui calcule un son à partir de valeurs de paramètres constituant les signaux de contrôle du dispositif.

¹¹⁴ P. Depalle, X. Rodet, D. Matignon, P. Pouilleute, « Premiers résultats sur les variables d'état et leur identification » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. II p. 319-350.

6. Savoir imiter pour mieux corrompre...

6.1. expérimentation, création d'un savoir

La modélisation est un outil scientifique qui permet de vérifier des hypothèses émises. Dans le cas des instruments, le modèle peut avoir la même utilité. Nous ne pouvons pas ignorer l'apport considérable de la psychoacoustique dans le domaine de la musique. Cette science se base sur l'expérimentation et étudie les relations entre les données physiques du son et leur perception. Dans le cadre de ces études, le modèle physique s'avère très utile car la simulation marque un retour à l'expérimentation.

« The nice thing about a physical model is that you can start with the simplest model and it will focus your attention on the deviation between the models . For example, if you use a linear model, you can see that you won't get any saturation, you won't get any harmonic generation, so you know non-linéarity is essential. (...) So the physical model can be used to focus your attention¹¹⁵. »

Le modèle physique est ainsi un outil d'exploration qui permet de formaliser les connaissances, et de tester les hypothèses. Il permet donc l'augmentation du savoir psychoacoustique. Sous cet éclairage, la fascination pour une synthèse imitative se justifie dans la mesure où elle stimule considérablement les recherches méthodologiques. La représentation d'un phénomène ou objet réel par un objet de substitution auditivement opérationnel permet de juger de façon sensible la pertinence des hypothèses.

L'objectif de la modélisation est donc la caractérisation des propriétés qui conditionnent une efficacité sonore puis musicale de l'objet. Ceci permet de comprendre les mécanismes physiques pour aider les facteurs d'instruments, par exemple. Les compositeurs ont également un bénéfice à tirer de ces connaissances car la synthèse par modélisation physique doit être guidée par la psychoacoustique.

¹¹⁵ Propos de A. Hirschberg, extraits de : « Physique des instruments, table ronde du 19 septembre 1990 » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. II p. 308.

Je traduis : « Ce qui est bien avec les modèles physiques, c'est que vous pouvez commencer avec le plus simple des modèles et que cela focalisera votre attention sur la déviation existante entre les deux objets. Par exemple, si vous utilisez un modèle linéaire, vous pourrez constater que vous n'obtiendrez aucune saturation, aucune génération d'harmoniques, et vous saurez alors que la non-linéarité est essentielle (...) Le modèle physique peut être, donc, utilisé pour focaliser votre attention. »

« On ne peut donc se contenter de travailler sur des épures de paramètres physiques sans se préoccuper de l'effet sensible car on risquerait de distordre complètement le projet compositionnel en l'incarnant dans le sensible auditif¹¹⁶. »

6.2. Imitation

L'imitation est toujours considérée comme un moyen de vérifier l'efficacité d'une technique de synthèse, elle donne un aperçu non seulement de sa finesse mais également de sa musicalité et de sa facilité de contrôle. A ce niveau, la synthèse par modèles physiques est considérée comme particulièrement efficace. Cependant chaque technique n'est pas efficace pour tous les types d'instruments. Par exemple, la synthèse réalisée avec Modalys est particulièrement convaincante en ce qui concerne les sons de percussions, en particulier les plaques. Kaija Saariaho a justement utilisé ce programme pour réaliser des sons de gong et de cloches quelle utilise dans son œuvre *Amers*¹¹⁷. En revanche la synthèse par guide d'ondes se distingue plutôt par la qualité de ses sons de cordes pincées, dont David Jaffe fait un usage abondant dans *Silicon Valley Breakdown*¹¹⁸.

Ce grand réalisme des imitations d'instruments exécutées par synthèse physique s'explique de plusieurs façons. Premièrement la présence d'un « corps à corps », ainsi défini par François Nicolas (voir annexe 1 § 1), permet d'associer le son à un geste physique. Comme l'explique Guillaume Loizillon (voir § III.3), le son est l'image d'un événement, ce qui permet de conserver la possibilité d'identifier une source physique même si elle est virtuelle.

« L'oreille ne se fonde pas sur un seul spectre pour identifier un timbre. En fait l'oreille a sans doute pour fonction originale, outre la mise en alerte, d'effectuer une véritable enquête sur l'origine du son : d'où vient-il (distance, azimut) et comment a-t-il été produit. C'est ce qui fait l'intérêt des modèles physiques. L'oreille a évolué dans un monde physique et son enquête l'amène à

¹¹⁶ J.-C. Risset, « Modèles physiques et perception - modèles physiques et composition » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1990, vol. III, p. 719.

¹¹⁷ *Amers* de Kaija Saariaho figure sur le disque d'exemples sonores (voir Annexe 2 § 3, CD1 Plage 26).

¹¹⁸ *Silicon Valley Breakdown* de David Jaffe figure sur le disque d'exemples sonores (voir Annexe 2 § 8.3, CD2 page 33).

connaître des caractères physiques de la source de son, son percussif sur une membrane tendue, sur une plaque métallique lourde, corde frottée ou pincée. Les modèles physiques nous permettent de simuler de telles sources de son ; en modifiant les paramètres de modèles physiques, on a des chances d'agir sur des aspects du son qui sont robustes, prégnants, pertinents pour l'audition.¹¹⁹. »

Ainsi, la manière la plus simple d'obtenir des sons intéressants consiste à tirer parti de la technologie des instruments classiques ou des sons naturels. Deuxièmement, comme le fait remarquer Kaija Saariaho¹²⁰, la synthèse par modèles physiques permet une parfaite restitution des transitoires d'attaque ce qui garantit un grand réalisme.

L'imitation de ce qui existe déjà, malgré sa qualité, peut être considérée comme une sorte de conservatisme sonore. La pure imitation ne peut être d'un grand intérêt pour une application. Comme nous l'enseigne Hegel, elle ne produit « que des chefs-d'œuvre de technique, jamais des œuvres d'art¹²¹ ». Cependant cette imitation constitue une étape d'appropriation, de connaissance, indispensable, avant d'avoir la possibilité de créer à partir de l'acquis. La synthèse d'un instrument est une représentation finie de ce dernier, mais elle devra essayer, malgré la finitude que lui impose toute formalisation, de rester ouverte à de multiples découvertes. Elle devra être envisagée comme une exploration intrinsèque de l'instrument et élargir les possibilités de jeu que l'on maîtrise physiquement. Elle ne pourra être féconde pour le musicien que si elle s'attache aux sons qui ne peuvent être exécutés ou maîtrisables par un instrumentiste, il s'agit donc de dépasser les limites du jeu instrumental, en affiner le contrôle des paramètres.

6.3. Transgression et invention : le potentiel musical du modèle

« ...la simulation par modèles physiques, il ne faut rien en attendre si on l'envisage, en musique par exemple, comme un substitut définitif aux instruments ou aux véritables objets vibrants.

¹¹⁹ J.-C. Risset, « Modèles physiques et perception - modèles physiques et composition » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1990, vol. III, p. 715.

¹²⁰ D. Cohen-Levinas, « Entretien avec Kaija Saariaho », *la synthèse sonore, cahier de l'IRCAM n°2*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, 1993, p. 34.

¹²¹ G. Hegel, *L'esthétique*, cité dans R. Caussé, « Non-linéarités et phénomènes non-linéaires dans les instruments à cordes » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. I p. 225.

Un simulacre coupé de ses racines ne peut que dépérir, se vider de toute vitalité. Alors que le peintre, aussi abstrait ou symbolique soit-il, retourne toujours au paysage, à la nature, pour dialoguer avec eux par le moyen de son art de représentation, il faut que l'ordinateur, toile où des objets très physiques peuvent venir se déposer en représentation, ne soit à aucun moment coupé de son vis à vis, de son horizon. La modélisation et la simulation des objets physiques, des instruments ou des corps vibrants est un dialogue avec le monde réel ; une simulation réalisée est une étape, une attente avant une autre¹²². »

La phase d'imitation permet d'apprendre à maîtriser une simulation, elle est très utile dans une optique de recherche, mais elle ne revêt pas d'intérêt musical. Tout l'intérêt des modèles résidera dans leur transformation, leur transgression ou dans l'invention de nouveaux objets à partir des éléments qui les composent. Toutes ces déviations effectuées à partir d'une simulation imitative enrichissent le potentiel musical du modèle et ne devront pas être écartées même si elles sont musicalement « incorrectes ».

Par exemple, ce qui peut être considéré comme une faiblesse de certains aspects de la simulation par modèles physiques, doit être prise en compte. Appréciée en tant que telle, et à sa juste valeur, elle peut et doit être exploitée de manière créatrice. Ces approximations dans la modélisation, distorsions nécessaires et intrinsèques aux modèles, sont des transgressions au regard d'une certaine réalité physique et de cette faiblesse devrait émerger une potentialité féconde. Par exemple, dans le cas d'une plaque, le périmètre extérieur est constitué d'un ensemble de points fixes qui délimitent la surface vibrante. Si cette plaque est frottée par un archet, le point de contact ne peut donc être qu'intérieur à celle-ci. L'archet transperce alors la plaque ce qui constitue une approximation, un événement impossible dans le monde réel (voir Figure 49). L'archet passe à travers la plaque comme un fantôme à travers un mur pourtant il y a frottement en un point défini. Ceci permet de déplacer le point de contact sur toute la surface de la plaque et d'obtenir des possibilités d'excitations bien plus diversifiées que dans la réalité.

Une autre simplification intervient lors de l'écoute du son produit par le modèle. La vibration est prise en un point précis de la structure, il n'y a donc pas perception du son rayonné. Ceci pourrait sembler gênant pourtant cela permet de n'écouter que des parties

¹²² C. Cadoz, « Simuler pour connaître / Connaître pour simuler. Réflexions sur la représentation, la modélisation, la simulation et la création avec l'ordinateur » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. III, p. 708.

restreintes de l'objet, de focaliser son attention sur une partie ou sur des points singuliers de l'objet observé, d'obtenir une vision particulière d'une structure et même d'explorer celle-ci en déplaçant le point d'écoute. Cette expérience est d'autant plus riche s'il s'agit d'un objet surfacique, tel un gong, et d'autant plus démonstrative si le gong est excité de manière entretenue, condition qui est obtenue, par exemple, grâce à la fixation d'une corde frottée sur ce dernier. Ainsi, l'écoute peut parcourir la surface de l'objet en divers sens, révélant de manière continue quelques aspects vibratoires. A la différence d'une structure linéaire, l'exploration ne pourra être exhaustive et sera toujours lacunaire ; loin d'être une limite, cette situation sera source de maintes représentations, toutes bien particulières.

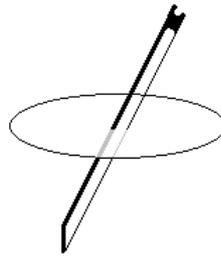


Figure 49 : représentation d'un phénomène impossible dans le réel, l'excitation d'une plaque circulaire par un archet qui la traverse.

Le modèle peut ainsi offrir un élargissement des virtualités offertes par les instruments. Les exemples de possibilités d'extension sont nombreux, on peut citer les multiphoniques¹²³ du violoncelle, le phénomène des sous harmoniques ainsi que divers autres mouvements particuliers des cordes. A partir d'une extrapolation de ces phénomènes pourtant compris dans l'instrument lui-même, on peut obtenir des sons inouïs. La modélisation physique offre alors la possibilité de simuler des gestes « surhumains », ainsi nommés non pas par suprématie ou supériorité de perfection mais plus par sur-définition, sur-précision, et dépassement des limites physiques. Elle permet d'exalter et maîtriser certains phénomènes présents ou possibles dans la réalité instrumentale mais qui ne peuvent techniquement être parfaitement contrôlés, et d'autres part d'engendrer des phénomènes inédits grâce à un pur dépassement technique, voir physique. Elle nous accorde des possibilités d'extension d'instruments connus, en timbre et en virtuosité, détachée de leur nature physique.

¹²³ Les multiphoniques s'effectuent en utilisant un doigté d'harmonique sur un point de la corde qui n'en comporte pas, la position et la pression de l'archet sont aussi déterminantes.

Le potentiel musical du modèle provient également du pouvoir, que possède le musicien, de transgresser les règles, de s'écarter d'une certaine logique, d'une norme qui correspondrait à une perception droite de la réalité.

« Si, parmi les physiciens, il est couramment admis l'existence de multiples types de vibrations pour la corde frottée, seulement deux ou trois types sont utilisés dans les applications musicales. Les autres, généralement émis lorsque l'instrumentiste se trouve aux limites du jeu normal, sont considérées comme donnant lieu à des sons "non satisfaisants", à la fois pour la qualité du son et pour la "mauvaise" vibration de la corde. Cependant on peut s'interroger, lorsque l'on cherche à étendre les possibilités sonores à partir des modèles de synthèse, sur la signification musicale de "non satisfaisant" ou le sens de "mauvais" pour la vibration de la corde.¹²⁴ »

Une illustration de ce genre de processus musicalement incorrect apparaît dans l'utilisation, a priori inadéquate, de contrôleurs. De ce décalage entre un modèle et un contrôleur inadapté pourrait surgir une potentialité fertile : nous pouvons envisager par exemple de jouer du piano ou un instrument de type corde frottée avec un contrôleur de souffle¹²⁵, d'un instrument à clavier avec un contrôleur de type percussif ou bien de l'orgue avec une guitare¹²⁶, etc.

Cette synthèse permet la création d'un instrumentarium sans limitations physiques, « monde instrumental parallèle » ancré dans le réel, et son prolongement dans l'impossible. Ce prolongement peut se faire, comme nous l'avons vu, par le déplacement des points d'excitation et d'écoute dans le cadre d'une simulation imitative. Mais il est également possible d'aller plus loin en opérant une variation de la structure même de l'objet simulé. La déformation en court de jeu de cette dernière permet d'exécuter, par exemple, des glissandi impossibles dans le réel. Ainsi, Kaija Saariaho a utilisé Modalys pour réaliser des glissandi

¹²⁴ R. Caussé, « Non-linéarités et phénomènes non-linéaires dans les instruments à cordes » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. I p. 226.

¹²⁵ A titre d'exemples, nous pouvons écouter des sons de cordes provenant du synthétiseur VL1 et exécutés avec un contrôleur de souffle WX7 (voir Annexe 2 § 6) : contrebasse jouée à l'archet (CD2 page 3), Mélange de trois voix de guitare avec basse (CD2 page 12) et son de cithare associé à un effet de guitare électrique (CD2 page 18).

¹²⁶ Je pense ici à un exemple sonore proposé en annexe 2 § 7 (CD2 page 30). Un « son d'orgue » est joué avec le VG8 de Roland : cet exemple n'est pas vraiment convaincant et prête surtout à sourire, mais il pourrait néanmoins correspondre à une volonté particulière de dérision.

de gong quelle exploite dans *Amers*¹²⁷. Ces sons, bien que n'ayant aucun équivalent dans le monde acoustique sont compris par l'oreille comme l'association de deux phénomènes familiers : le timbre du gong et la notion de glissando.

Une autre transformation peut provenir de l'hybridation de deux structures ou plus¹²⁸. La technique d'hybridation est particulièrement convaincante dans le logiciel Modalys, elle permet d'opérer un passage dans le temps d'une structure à une autre ou de mélanger deux structures comme collées ensemble. Comme pour le glissando de gong, l'hybridation exécute un mélange de deux (ou plus) structures bien définies et ancrées dans l'expérience, ce qui produit quelque chose qui est à la fois inconnu et étrangement familier. Pour François Nicolas¹²⁹, l'intérêt musical de ces objets hybrides, bien qu'utilisant la rigueur et les contraintes de ce mode de synthèse, est de pousser les virtualités dans des directions physiquement impossibles, voire aberrantes.

Au delà des hybrides, les techniques de synthèse par modèles physiques permettent de créer de véritables monstres ou chimères.

« La synthèse par modèles physiques actualise des couples de composantes impossibles à associer dans la nature - chimères d'une timbale excitée par une attaque de clarinette, d'un biseau de flûte activant les résonances d'un tam-tam...¹³⁰ »

Ceci permet de créer les instruments les plus délirants. Rien ne nous retient à part les limites de notre propre imagination. Nous pourrions retrouver le son d'instruments dont seule la représentation graphique subsiste ou connaître enfin de son émis par le célèbre gaffophone. Des expériences de ce type ont été réalisées au département SOLE de l'université de Paris XV sous la direction de Thierry Meunière, et ont abouti à des créations étranges comme une flûte traversière torique (voir Figure 50), une guitare quadridimensionnelle un orgue à plasma, etc. Sans aller jusqu'à de telles extrémités, la simple association d'éléments hétéroclites, comme, par exemple, l'excitation d'une

¹²⁷ *Amers* de Kaija Saariaho figure sur le disque d'exemples sonores (voir Annexe 2 § 3, CD1 Plaque 26).

¹²⁸ A titre d'exemples, nous pouvons écouter un son réalisé avec Modalys : Membrane changeant de matériau. (CD1 Plaque 10).

¹²⁹ F. Nicolas, « Comment peut-on envisager de composer avec Mosaïc ? » in *Dans la distance : Cahier d'exploitation*, Marc Battier ed., Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, p. 39-46.

¹³⁰ M. Laliberté, « Informatique musicale : utopies et réalités », dans *Utopies, cahier de l'Ircam n°4*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, p. 168-169.

membrane de tambour par une anche simple ou d'une corde par un biseau, permet d'obtenir des résultats déjà surprenants.

La synthèse par modèles physiques peut être également utilisée comme traitement. Modalys permet facilement d'injecter un fichier son, sur une plaque, pour l'exciter. Le son subit une déformation (résonances métalliques) qui peut être considérée comme un traitement. Il est possible d'utiliser comme source d'excitation de n'importe quel modèle tous les sons possibles. Pour Guillaume Loizillon, ceci est d'un intérêt musical particulier, il l'utilise dans son œuvre *Fleurs et Insectes* de manière très nette¹³¹.

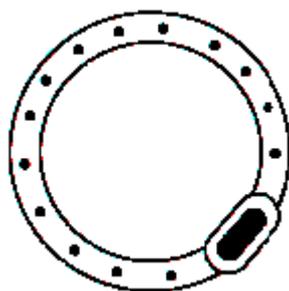


Figure 50 : Schéma d'une flûte traversière torique.

Nous constatons, à travers ces remarques que le modèle est bien loin d'être une copie mais une re-description, une ré-interprétation d'une certaine réalité. La synthèse par modèles physiques réintroduit cependant l'axe de la référence dans la création musicale par ordinateur, ce qui permet de produire des événements musicaux à la fois inouïs et familiers. Elle offre la possibilité de créer un instrument en vue, de l'adapter à un système musical ou d'en inventer un nouveau. Pour Guillaume Loizillon ses sons-événements, rattachés à une nature physique familière permettent la création d'un imaginaire qui ne pouvait pas l'être avant. Cette technique possède également une aptitude à restituer des interactions physiques entre musicien et instrument, notion à laquelle François Nicolas est très attaché.

La synthèse par modèles physiques ne permet pas seulement de créer des objets vibrants, mais aussi d'en jouer en spécifiant les gestes à l'ordinateur qui va en calculer le résultat :

« Un des grands problèmes des synthétiseurs par échantillonnage, avec lesquels on essaie d'imiter les instruments existant, c'est leur manque de "règles de prosodie" en matière de phrasé musical. Séparément, les notes peuvent passer pour des

¹³¹ *Fleurs et Insectes* de Guillaume Loizillon figure sur le disque d'exemples sonores (voir Annexe 2 § 5.2, CD2 page 2).

reproductions réalistes de sons instrumentaux traditionnels, mais, lorsqu'elles sont accolées, les transitions d'une note à une autre - qui sont si importantes avec des instruments comme le saxophone ou la voix humaine - font cruellement défaut.¹³² »

Cette possibilité de phrasé qui fait défaut à la technique d'échantillonnage est une des grandes qualités de la synthèse par modèles physiques. Comme le remarque Kaija Saariaho¹³³, cette technique est particulièrement efficace en ce qui concerne la synthèse des transitoires. De plus, elle travaille sur des paramètres plus larges, plus musicaux que de simples données physiques du son. Le jeu opéré sur la transformation du réel et sur l'imagination d'un geste permet la simulation d'une intention et non un d'un simple son isolé.

Un objet vibrant issu d'une synthèse par modèles physiques n'est pas unique mais multiple en raison de la profusion des regards que l'on peut poser sur lui. Construire un objet vibrant en ajustant ses divers paramètres physiques revient à former un réservoir de potentialités qui émergeront différemment selon l'utilisation du modèle. Toute structure vibrante contient une richesse potentielle virtuelle, de multiples états vibratoires qui pourront ensuite être explorés. Si cet aspect n'a rien d'exceptionnel en regard de la réalité physique à laquelle la synthèse par modèles physiques se réfère, cet aspect nous semble particulièrement innovant dans le domaine de la synthèse sonore et déterminant quant aux modalités d'utilisation qu'elle propose au compositeur. L'utilisateur provoque l'émergence progressive du modèle en le caractérisant par un certain nombre d'attributs physiques. Ce processus est présent à tous les stades de choix que fait l'utilisateur, la multiplicité régnant à tous les niveaux : choix de la structure (corde, plaque...), du matériau (prédéfini ou réglable : densité, raideur...), de l'excitation (frottement, pincement...), et du mode de jeu (longitudinal, transversal...). La notion d'instrument, dans la synthèse et la simulation par modèles physiques, correspond à une généralisation de la qualité intrinsèque de l'instrument dans sa définition traditionnelle, une surenchère de sa tendance à la multiplicité, une exaltation de la richesse potentielle initialement inscrite dans tout instrument. Ces modèles s'attachent à décrire non pas l'individualité d'un objet unique mais la spécificité d'une catégorie d'objets. Ce qui permet de créer une classe virtuelle d'objets

¹³² J. O. Smith, « Observations sur l'histoire de la synthèse numérique du son » dans *la synthèse sonore, cahier de l'Ircam n°2*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, 1996, p. 86. (traduction de l'anglais par Jacqueline Henry)

vibrants gravitant autour d'un objet de référence. L'exploration de cette multiplicité contenue potentiellement dans le modèle peut s'envisager de diverses manières. La variation des paramètres du modèle permet d'obtenir de larges gammes de timbres. La création du modèle physique induit donc un choix pour l'instrument allant d'une classe générale d'instrument, à un instrument en particulier. Ceci permet inversement d'élargir le timbre en faisant retour arrière vers une classe plus générale.

La création, la transformation et l'exploitation du modèle nécessitent la manipulation des paramètres qui vont le définir.

« Ce système (...) vise à étendre par la simulation le champ d'investigation du créateur tout en conservant une propriété précieuse des instruments les plus traditionnels (pour être précis ceux qui n'utilisent aucun dispositif amplificateur), à savoir d'être finement contrôlable par l'action gestuelle¹³⁴. »

Ce contrôle passe parfois par l'emploi d'interfaces ou de dispositifs gestuels. L'idée d'utiliser un principe de manipulation proche de l'instrumental s'explique par cette remarque de H.Vinet :

« Le corps a sa propre pensée, le corps au sens de motricité. Cette pensée est plus rapide qu'une pensée de raisonnement ou une pensée de formulation. Essayer par exemple de descendre un escalier, quatre à quatre, en pensant à ce que vous faites, vous n'y arriverez pas. Le corps prends des décisions (exemple : la situation de conduite automobile). L'intérêt du modèle physique dans une situation de musique qui n'est pas complètement une situation d'écriture, et qui inclue une situation expérimentale, c'est de restituer des aspects qui sont directement "préhensibles" par le corps. Les personnes qui se coupent de cette possibilité ne tirent pas parti de toutes leurs potentialités créatrices¹³⁵. »

¹³³ D. Cohen-Levinas, « Entretien avec Kaija Saariaho », *la synthèse sonore, cahier de l'IRCAM n°2* Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, 1993, p. 13-41.

¹³⁴ J. L. Florens, « Autour de la simulation instrumentale modulaire et du contrôle gestuel : Quelques problèmes théoriques et d'implantation » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. II p. 403.

¹³⁵ H. Vinet, « représentation, simulation, création, table ronde du 21 septembre 1990 » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. II p. 363.

7. Le contrôle du modèle simulé

« La synthèse permet d'obtenir des sons parfaitement connus, par construction, dans tous les détails, il faut les spécifier, l'ordinateur ne le fera pas de lui-même, à moins qu'on ne l'instruise à le faire¹³⁶. »

Si la création des algorithmes permettant de simuler un objet vibrant est longue et complexe, trouver les bons paramètres qui permettront de piloter le modèle est loin d'être une chose simple. Non seulement la précision point par point des paramètres est fastidieuse, mais l'opérateur n'a pas de repères pour savoir quelles valeurs correspondent au son qu'il imagine. Si les contrôleurs sont si importants, c'est sans doute à cause de l'importance sensible du geste. Le geste est ancré dans notre expérience et est beaucoup plus signifiant que les chiffres quand il s'agit d'appréhender le son qui lui correspond. De plus, un seul geste peut contenir en lui de nombreux paramètres dont les évolutions sont plus ou moins liées, et le musicien n'a pas idée de ces valeurs qui correspondent à un geste qu'il fait instinctivement.

Dans un logiciel comme Modalys, le geste est spécifié de façon numérique, et l'utilisateur est relégué à une passivité physique vis à vis de l'instrument. Son seul rapport à son action sur la matière vibrante est d'ordre auditif ce qui crée une certaine distance entre l'instrument et l'instrumentiste (voir Figure 51). Ceci pose parfois quelques difficultés d'interprétation lorsque les modalités d'excitation et/ou la structure considérée échappent à la réalité instrumentale traditionnelle ou physique.

« Pour transférer l'ancienne excellence en matière d'exécution musicale sur les nouveaux instruments numériques, il faut soit fournir une interface d'exécutant humain - tendance en vogue - soit fournir un niveau de commande logicielle qui connaît un certain contexte musical. »

Une solution couramment adoptée consiste à utiliser des contrôleurs MIDI. Ces contrôleurs sont limités à peu de paramètres (1 ou 2) et malheureusement, ne présentent pas

¹³⁶ J.-C. Risset, « Modèles physiques et perception - modèles physiques et composition » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. III, p. 714.

le retour tactile indispensable pour une véritable interactivité. Ces contrôleurs ne sont véritablement efficaces que lorsqu'ils sont en accord avec la structure modélisée, son mode d'excitation et les paramètres de contrôle. Par exemple, pour contrôler un modèle de clarinette sous Modalys, le contrôleur le plus adéquat sera un contrôleur MIDI de souffle comme le WX7 de Yamaha (voir § II.5.1.3). Cette stratégie est systématisée et exploitée commercialement dans la synthèse par guides d'ondes, et tire parti du calcul en temps réel des sons de cette technique pour aboutir à la constitution d'instruments à part entière incluant de nombreux capteurs. Le WX7 de Yamaha, associé au VL1, est un exemple représentatif d'une exploitation commerciale de cette méthode. Un autre exemple significatif est le méta-contrôleur HIRN élaboré par Perry Cook. Ce contrôleur HIRN (voir § II.4.4), méta-instrument à vent, contrôlant des modélisations de bois et de cuivre par guides d'ondes, apporte une solution similaire à ce problème, le retour n'est toujours pas de nature tactile, mais sonore, avec la même possibilité d'agir en temps réel sur les modèles physiques.

Mais, exception faite de quelques configurations reproduisant les modalités de contrôle d'une situation instrumentale traditionnelle, le plus souvent, ce type de démarche conduit uniquement à une facilité et une immédiateté de manipulation des paramètres, ou plus généralement de simples déclenchements « modulés » des modèles physiques, comme dans le cas des synthétiseurs commerciaux dédiés à la génération sonore utilisant la modélisation par guides d'ondes. Dans ce cas, un clavier et des contrôleurs associés (molette de modulation, etc.) permettent le « jeu » d'instruments les plus divers allant des cuivres aux cordes frottées. Le « hiatus gestuel » se trouve, dans ces conditions, particulièrement flagrant, et bien qu'il soit un compromis relativement efficace, il conduit à une certaine « stérilisation » du geste qui n'est pas sans conséquence sur une exploitation créatrice des modèles physiques.

Une autre chaîne de simulation de type mixte peut être envisagée en associant à la machine, comme contrôleur, un instrument acoustique pourvu de capteurs sélectionnant certains types de gestes associés à des paramètres du modèle. L'instrumentiste effectue alors une action gestuelle physique traditionnelle sur un instrument tout aussi traditionnel et reçoit deux types de retour ayant des origines différentes. Le retour tactile, sachant que n'est entretenue à proprement parler aucune relation directe avec le modèle simulé, se fera uniquement par l'intermédiaire de l'instrument traditionnel. En revanche, le retour sonore sera double, engendré d'une part par l'instrument même et d'autre part par le modèle. Un

instrument de ce type est le VG8, où une véritable guitare est utilisée comme contrôleur (voir § II.5.2.2).

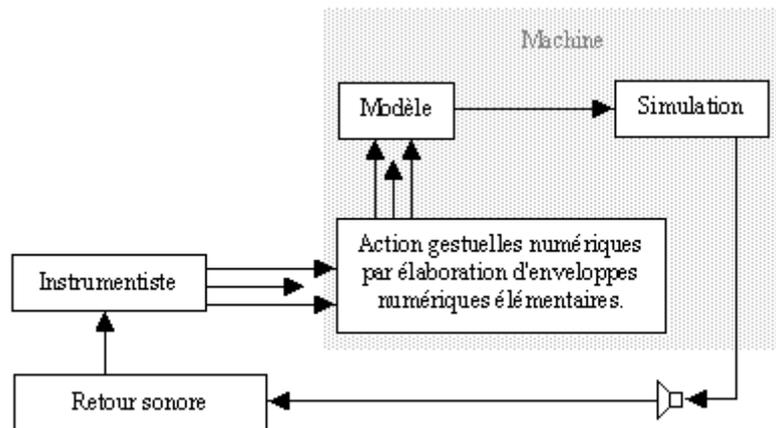


Figure 51 : Simulation « mécanique » fondée sur un geste spécifié numériquement : système Modalys.

Nous pouvons citer également les « hyper-instruments » développés par le compositeur Tod Machover, au département musique du Media Lab au MIT, et élaborés à partir d'instruments traditionnels tels que violon, violoncelle, piano, auxquels sont associés diverses interfaces et des ordinateurs. Initialement élaborés pour une relation plus intime et une interaction entre le monde instrumental et celui de la synthèse sonore, ils pourraient être employés, moyennant quelques ajustements comme macro-contrôleurs d'une synthèse par modèles physiques, car ils sont pourvus d'un certain nombre de capteurs permettant d'intercepter l'évolution des principaux paramètres propres au jeu de l'instrument considéré. Tod machover précise, dans un article de Denis Fortier, paru dans Le Monde du 22 septembre 1994, que ces instruments « apportent une dimension souvent absente dans l'informatique musicale. Ils permettent d'allier le confort technique du studio à la spontanéité de la musique exécutée sur scène, devant un public. »

L'un des intérêts de cette chaîne mixte de simulation pourrait résider dans le fait de pouvoir instaurer une distance entre l'instrument faisant état de transducteur et l'instrument simulé. C'est ainsi que ce dernier pourra être une image déformée du premier ou plus encore s'en différencier radicalement (voir Annexe 2 § 7). Cette chaîne de simulation ne permet pas de contact direct avec la structure vibrante, mais elle permet une maîtrise globale du modèle, en imprégnant son jeu de la spontanéité et de la souplesse du geste instrumental premier.

« Dans le cas du geste d'excitation, il sera nécessaire d'introduire une fonction de rétroaction mécanique du transducteur vers l'opérateur de façon à permettre à l'instrumentiste de recevoir une information tactile en provenance de l'objet qu'il manipule¹³⁷. »

Une certaine forme de retour tactile pourrait être envisagée face aux instruments MIDI à percussion où la surface à frapper subsiste et par la même la résistance de la matière¹³⁸. Les instruments acoustiques servant de contrôleurs offrent également une sorte de contrôle tactile. Mais le seul à offrir une interaction pure avec le modèle est le TGR (voir § 3.1.5) - transducteur gestuel à retour d'effort - utilisé avec le système Cordis de synthèse en temps réel (voir Figure 52). Dans une chaîne de simulation utilisant un instrument acoustique, la sélection des paramètres gestuels se fait en fin de chaîne instrumentale, alors que dans une chaîne interactive pure, comme dans le cas du TGR, elle est première, directement inscrite dans l'élaboration de l'instrument transducteur. Cet instrument étant défini suivant des canaux gestuels bien déterminés, le geste instrumental qui lui est associé sera donc réduit à ces quelques dimensions gestuelles. Ainsi, à l'hétérogénéité de moyens de la chaîne mixte s'oppose une parfaite homogénéité de l'ensemble du système interactif pur. Le geste instrumental est ainsi réintroduit comme « une adaptation du rapport homme-machine fondée sur la restitution des conditions ergonomiques semblables à celle de la relation instrumentale traditionnelle¹³⁹ ». Le TGR, grâce à la multiplicité de ses canaux gestuels, permet de gérer simultanément l'évolution de plusieurs paramètres, comme pour un geste instrumental traditionnel. Le retour d'effort permet de simuler la résistance et la réaction de la matière excitée, garantissant ainsi une bonne interactivité et ce, en temps réel. De plus, l'enregistrement du geste effectué permet des retouches ou manipulations ultérieures.

¹³⁷ C. Cadoz, « Instrumental gesture and musical composition », in *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Cologne, International Computer Music Association, 1988.

¹³⁸ Je fais ici allusion à un instrument comme le Wave Drum (voir § II.5.2.1) regroupant différentes caisses qui sont constitués d'une membrane synthétique munie d'un capteur sensible. Cet instrument ne permet de produire aucun son en lui-même mais permet de déclencher via un convertisseur, des événements MIDI suivant l'attaque et l'intensité du coup de baguette détecté par le capteur.

¹³⁹ C. Cadoz, « Instrumental gesture and musical composition », in *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Cologne, International Computer Music Association, 1988.

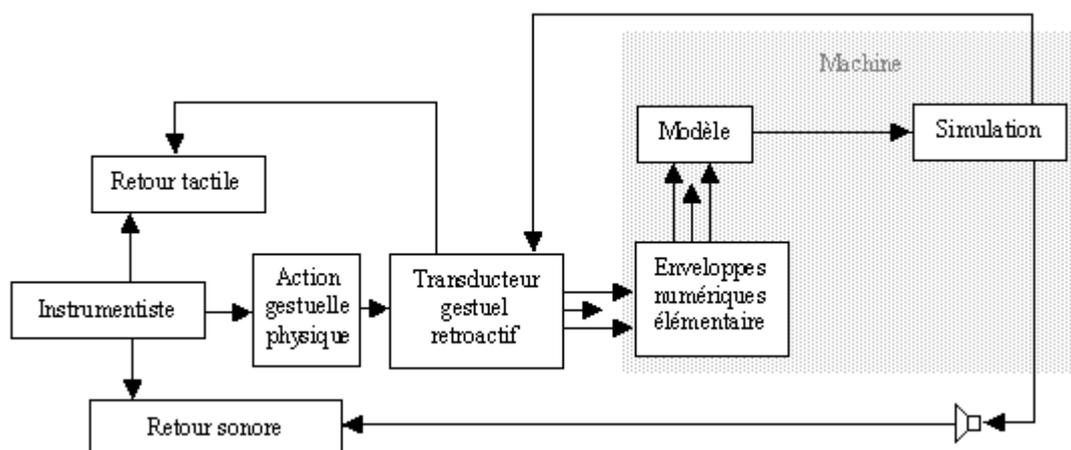


Figure 52 : Simulation interactive fondée sur l'emploi d'un contrôleur gestuel rétroactif : système Cordis avec le TGR.

Cordis Anima est la seule technique de simulation qui offre, grâce à ses transducteurs gestuels (voir § II.3.1.5), une chaîne de simulation véritablement interactive, avec une totale emprise sur la matière vibrante permise par le retour tactile. Il paraît être le seul, jusqu'à présent, à remplir toutes ces conditions particulières d'interaction et il est certain qu'une telle interactivité n'est possible qu'au sein de la synthèse par modèles physiques. La chaîne interactive résout aisément les difficultés de manipulation, et permet l'exécution de séquences musicales en toute liberté, facilité et flexibilité, car « la façon la plus économique de communiquer des informations de nature gestuelle est gestuelle¹³⁹ ». L'interaction entre instrumentiste et instrument sera totale suivant les canaux gestuels prédéfinis, mais intervient le problème d'un apprentissage instrumental.

« Pour l'application musicale d'un modèle physique, il est essentiel de pouvoir en jouer de façon juste, contrôlée et expressive. Aussi bon que soit le modèle, il reste cependant à apprendre à en jouer, et on sait d'expérience que l'apprentissage n'est pas immédiat¹⁴⁰. »

Lorsque les contrôleurs sont proches des modèles instrumentaux, il est possible de faire appel à des virtuoses existants pour en jouer. Cependant, comme le fait remarquer François Nicolas¹⁴¹, seuls de nouveaux gestes parfaitement adaptés aux objets vibrants simulés pourraient être vraiment intéressants. Or, dans le cas de contrôleurs originaux, il y

¹⁴⁰ X. Rodet, P. Depalle, G. Fleury, F. Lazarus, « Modèles de signaux et modèles physiques d'instruments : études et comparaisons » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. II p. 359.

aura nécessité d'attendre que de nouveaux virtuoses se forment, mais cet instrument durera-t-il ? Les Ondes Martenot et le Theremin sont des exceptions, bien d'autres instruments inventés au cours du XX^{ème} siècle ont disparu ou du moins ne font l'objet d'aucune création d'œuvre. De plus, les modèles physiques ne sont même pas des instruments au sens matériel du terme : les instrumentistes préféreront apprendre un instrument dont le répertoire est suffisamment important et susceptible de s'enrichir de nouvelles créations. Si les contrôleurs sont inédits, ils ne devront donc nécessiter quasiment aucun apprentissage, mais cela induit que le contrôle sera basique et peu intéressant. C'est un cercle vicieux.

D'une utilisation de contrôleurs, a priori inadéquate - jouer d'un instrument de type cordes frottées avec un contrôleur de souffle, d'un instrument à clavier avec un contrôleur de type percussif, jouer de l'orgue avec une guitare¹⁴², etc. - pourrait surgir une potentialité fertile. Cependant tous les efforts pour offrir à l'utilisateur des interfaces efficaces n'apportent pas que des avantages, certaines limites surgiront en raison même de la nature du transducteur ou de l'instrument, et de sa manipulation, bridée en quelque sorte par les possibilités tactiles et gestuelles de l'instrumentiste.

Seul un contrôle compositionnel peut permettre de dépasser les limites de la réalité gestuelle instrumentale et de la physique. La démarche interactive se limite à la sphère de « l'humainement » possible, du « physiquement » et du « gestuelement » possible. Le potentiel contenu dans la précision numérique peut-être plus efficace et plus fertile car elle substitue au simulacre de la simulation instrumentale, la parodie et la caricature d'une simulation numérique excessive dans sa précision.

« Il est évident que la question du contrôle est une des questions les plus importantes, mais je trouve qu'on s'en débarrasse à bon compte en disant qu'une manière de la résoudre c'est de réintroduire un musicien dans la boucle. C'est bien sûr intéressant, mais pendant des années qu'on a connues, on n'a pas pu le faire parce que la technologie ne le permettait pas. Incontestablement, il y a un progrès qui va arriver à partir du moment où on pourra le faire ; mais ce serait dommage d'oublier que l'ordinateur est aussi un dispositif d'écriture dans lequel cette partie du contrôle pourrait aussi être pris en charge. Il me semble

¹⁴¹ Voir annexe 1 § 1 Entretien avec François Nicolas.

¹⁴² Je pense ici à un exemple sonore proposé en Annexe 2 § 7 (CD2 page 30). Un « son d'orgue » est joué avec le VG8 de Roland : cet exemple, pas vraiment convaincant, prêtant surtout à sourire, pourrait néanmoins correspondre à une volonté particulière de dérision.

que cet aspect là des choses est un aspect fondamental puisque ce que l'on peut faire avec l'ordinateur, c'est mettre en continuité justement la définition du matériau et le contrôle. Mais cela n'apparaît pas être la seule dimension importante à exploiter que de dire qu'il faut remettre cette dimension du contrôle entre les mains de l'instrumentiste. Je dirais même bien au contraire, il me semble que ce qui se passe avec l'ordinateur c'est qu'on a la possibilité de donner la dimension du contrôle au compositeur¹⁴³. »

Jean-Baptiste Barrière souligne ici l'importance de l'écriture et du contrôle compositionnel. Il y a opposition entre contrôle gestuel¹⁴⁴ et contrôle compositionnel pour lequel les actions gestuelles sont élaborées séparément et numériquement. La partition, la représentation abstraite, l'écoute intérieure et la prise de distance, sont, de même, des notions particulièrement importantes pour le compositeur François Nicolas¹⁴⁵.

Dans un cadre machinique, comme le logiciel Mosaïc, on peut remédier à la difficulté de contrôle en utilisant des outils extérieurs au système. La génération des enveloppes pourra être simulée par l'utilisation d'outils permettant une création rapide, conviviale et efficace de fonctions, même complexes, par simple tracé graphique ou par entrée d'équations. Comme exemple, peut-être citée la réalisation d'une simulation de clarinette par Luis Naon, grâce au logiciel Patchwork qui permet la gestion de paramètres nécessitant de fréquentes et précises variations, entre autres, celui de la pression d'air.

Dans le cadre du logiciel Cordis, la mémorisation du geste associée à une transformation (voir § II.3.1.5), permet d'ajouter à la fluidité du jeu instrumental, les capacités illimitées du numérique et la possibilité d'échapper à la sphère du physique, de « l'humainement » possible.

Les deux formes d'outils, le contrôleur gestuel, et les enveloppes des diverses composantes gestuelles élaborées méthodiquement et de manière dissociée, loin de s'exclure sont complémentaires, le premier contrôlant dans l'immédiateté les divers paramètres gestuels de manière globale et par essence en totale synchronisation, le second s'attachant au perfectionnement du geste, s'appliquant à construire un ensemble complexe

¹⁴³ Propos de J. -B. Barrière extraits de : « Modèles physiques pour la synthèse sonore, table ronde du 20 septembre 1990 » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. II p. 632.

¹⁴⁴ En temps différé, ce contrôle gestuel pourra se transformer en contrôle compositionnel, voir § II.3.1.5 *Représentation du geste et son traitement*.

¹⁴⁵ Voir annexe 1 § 1 Entretien avec François Nicolas.

de paramètres susceptibles de gérer de façon continue la multiplicité des opérations, c'est à dire de constituer un hyper-geste plus mental que physique.

Avant tout, les contrôleurs gestuels ou compositionnels doivent permettre une réalisation musicale et expressive. La facilité d'utilisation ne peut pas être un critère suffisant comme l'explique Jean Claude Risset :

« Je ne pense absolument pas que c'est en rendant la musique plus facile à faire que l'ordinateur peut aider à la rendre plus intéressante.¹⁴⁶ »

Malgré les efforts fournis pour créer les modèles et les manipuler, le résultat sonore ne semble pas avoir une dimension réellement vivante, naturelle, si on ne se préoccupe pas des problèmes de rayonnement des instruments simulés, de leur mise en espace et de la diffusion des sons produits.

¹⁴⁶ Propos de J.-C. Risset extraits de : « Modèles physiques pour la synthèse sonore, table ronde du 20 septembre 1990 » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. II p. 359.

8. Espace, rayonnement et diffusion des sons synthétisés

L'espace semble être une valeur fondamentale, voire fondatrice, de la synthèse par modèles physiques, et tout particulièrement par représentation modale. Désormais, au sein du monde de synthèse sonore, l'espace n'est plus seulement une qualité, une « dimension » ajoutée au son, mais il est intrinsèquement lié au son dans ses moindres paramètres.

8.1. L'espace

La notion d'espace est présente implicitement ou explicitement à tous les niveaux d'élaboration des modèles. La synthèse par guide d'onde, plus proche des techniques par modèles de signaux, fait un usage réduit et uniquement métaphorique de l'espace. Au contraire, la notion d'espace est présente à tous les stades de l'élaboration dans la synthèse modale. Elle se manifeste tout d'abord au niveau de la construction des structures vibrantes mises à disposition : les réseaux de masses de Cordis-Anima ou les objets (plaques, membranes...) de modalys sont explicitement mis en espace. Des paramètres à caractère spatial sont utilisés par l'opérateur et le positionnement des excitations et points d'écoutes en des points précis induisent également une spatialisation.

Comme nous l'avons expliqué précédemment (voir § III.6.3), l'imitation des sons instrumentaux réel ne peut être le but de la synthèse par modèles physiques, mais doit rester un « entraînement » pour mieux inventer ensuite de nouveaux sons. Dans ce sens, la spatialisation doit permettre de guider la perception et d'aider à la reconnaissance de la forme globale de l'objet vibrant. Si la nature de la structure est reconnue sans équivoques, alors une spatialisation peut être perçue comme une redondance. Cependant elle apporte un plus, en confortant la perception première, et en apportant plus de relief, de véracité et surtout de dynamisme au sein de l'objet considéré. Lorsque la nature de la structure est incertaine ou lorsque réside une fragilité dans sa perception, toute spatialisation permettra d'orienter l'auditeur, vers une forme probable de l'objet, et ainsi, vers une perception causale plus précise. Ainsi, comme nous l'avons expliqué précédemment (voir § III.6.3), l'identification de la source sonore garantit un certain réalisme, et permet à l'auditeur d'établir une relation d'affectivité avec le son, qui ne peut exister avec des sons purement synthétiques, sans lien avec le réel. L'intervention du visuel, comme peut le permettre Anima, apporte, dans les cas extrêmes, le secours nécessaire à l'auditeur et lui impose la

forme de l'objet générateur du son perçu. A partir de là, il est possible d'imaginer un détournement de l'image, permettant d'apporter humour ou ambiguïté à un son parfaitement identifié.

Mais la mise en espace des sons pose plusieurs problèmes. Dans le monde réel, les points d'écoute sont placés directement au contact de l'objet, alors que dans la réalité, l'instrument de musique est perçu dans sa globalité. Pour éviter un aspect trop ponctuel de l'écoute du modèle numérique simulée, il est possible de multiplier les points d'écoute sur la structure, permettant ainsi un enrichissement du spectre résultant, et de livrer à l'auditeur la quasi-totalité du message fourni par l'objet excité. La situation idéale consisterait à placer sur l'objet une infinité de point d'accès, mais cela ne serait pas encore suffisant pour donner une perception inductive de l'espace propre d'une structure vibrante.

8.2. Le rayonnement

Une autre considération du monde physique réel doit être prise en compte, le fait que l'auditeur se trouve non sur l'objet mais hors de l'objet, ce qui induit la présence d'un espace englobant la source et l'auditeur. Ainsi, le son, dans la réalité, n'est jamais perçu en tant que tel, l'auditeur reçoit en fait le reflet de ce son, transformé par les caractéristiques du lieu où se déroule l'exécution musicale. Ces reflets constituent le rayonnement sonore de l'objet, dont la forme dépend directement des modes vibratoires de la structure. Or, dans le monde numérique des synthèses par modèles physiques, on fait fi du milieu immergeant, seules sont prises en compte les informations fournies par le milieu générateur. Et, malheureusement, les écoutes sur la matière, même avec reconstitution spatiale de la structure, ne peuvent avoir leur équivalent dans le monde physique réel perceptible. L'introduction du rayonnement prolonge assez naturellement l'attitude des synthèses par modèles physiques face au phénomène sonore. En effet, elle permet d'accéder à une réalité plus prégnante, à une reconstitution plus fidèle du phénomène physique. Après avoir modélisé les vibrations de la structure, elle permettra de simuler leur incidence sur le milieu transmetteur, l'immersion du modèle physique dans l'air. Enfin, l'utilisation de modèles d'acoustique des salles permettra de faire naviguer l'auditeur autour de l'objet vibrant sonore et rayonnant. Ainsi, si la synthèse par modèles physiques permet de construire des structures vibrantes de spatialité potentielle et de leur donner voix, la

modélisation du rayonnement et d'une contextualisation tridimensionnelle leur donnera chair.

De nombreuses études et par suite élaborations de modèles suivant diverses techniques ont été effectuées par les scientifiques sur le phénomène du rayonnement. J. M. Adrien est le premier à s'être penché sur la question, en 1989, en projetant d'effectuer une modélisation du rayonnement du violon fondée sur le formalisme modal. Après avoir modélisé la caisse, les cordes, et leurs différents modes de vibration, il a simulé la propagation de ces vibrations dans l'air jusqu'à un point fictif d'écoute. Le son obtenu correspond ainsi au son rayonné par un instrument réel, écouté à une certaine distance : la démarche est intéressante, mais elle ne résout malheureusement pas le problème de neutralité de rayonnement du moyen de diffusion.

Un projet de « sources virtuelles » simulant le rayonnement d'un instrument, alliant une modélisation du rayonnement à un nouveau système de diffusion, est en cours d'élaboration à l'IRCAM, grâce à la collaboration de l'équipe d'acoustique instrumentale dirigée par René Caussé - pour la constitution des modèles de rayonnement - et celle d'acoustique des salles dirigée par Olivier Warusfel - pour le problème de la diffusion proprement dite -. Ce projet de « source virtuelle » devra permettre la restitution des modes de rayonnement propres à chaque instrument avec leurs caractéristiques de directivité, variables en fonction de la fréquence. Le son instrumental capté sans rayonnement sera envoyé dans un système de traitement informatique qui déterminera la directivité en fonction de la fréquence, le signal ainsi obtenu sera distribué sur plusieurs haut-parleurs à directivité variable (voir Figure 53). En d'autres termes, un signal d'entrée unique engendrera, en passant dans un système complexe de filtres, plusieurs signaux de sortie qui seront diversement distribués sur un ensemble de haut-parleurs, dont la forme de directivité ainsi que leur affectation aux signaux de sortie seront gérés par ce même système.

Le rayonnement de certains instruments à été ainsi reconstitué, par exemple celui du trombone ou encore celui du tam-tam. Dans l'avenir, ce procédé pourra être étendu à des objets sonores fictifs, ne reproduisant aucun instrument connu. Ce procédé pourra être appliqué, entre autres, à la sonorisation d'œuvres musicales « mixtes » associant des parties instrumentales et électroniques (bande, dispositif de synthèse ou de traitement), le système permettant d'homogénéiser le rayonnement des sources électroacoustiques avec celui des instruments.

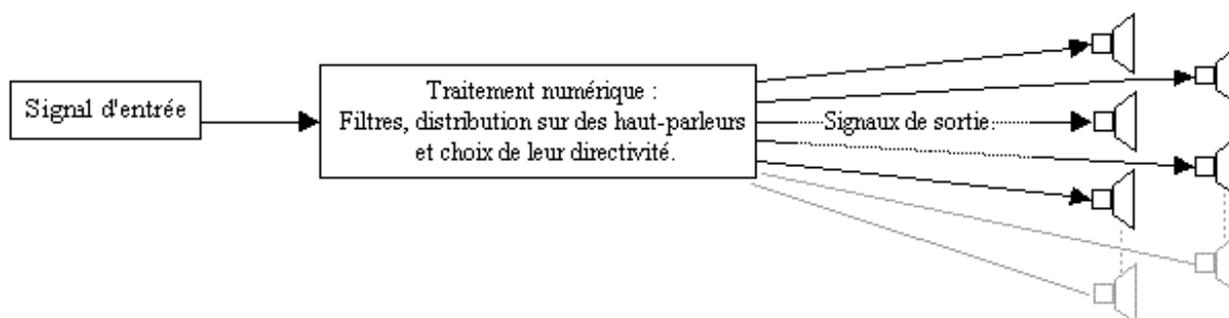


Figure 53 : Représentation schématique de la diffusion de « source virtuelle » en développement à l'IRCAM.

Ce moyen de modélisation du rayonnement sonore et de diffusion n'est pas attaché à un signal d'entrée particulier. Ceci apporte une grande souplesse d'utilisation, cependant, son intégration dans la technique des modèles physiques, notamment la synthèse modale à laquelle Modalys appartient, n'a pas encore été envisagée.

Une démarche analogue a été effectuée, cette fois dans le formalisme des guides d'ondes, au laboratoire d'acoustique d'Helsinki¹⁴⁷, en prolongeant la simulation d'instruments virtuels en guides d'ondes, en l'associant à celles d'un espace tridimensionnel et du lieu d'écoute. Ainsi, des sons de synthèse d'instruments à cordes pincées et de bois, possédant leur forme de rayonnement propre, sont combinés à une simulation de salle et à des techniques d'auralisation¹⁴⁸. Le résultat de cette mise en cascade de simulations est une salle virtuelle en trois dimensions dans laquelle l'auditeur et de multiples instruments virtuels peuvent circuler, et ce en temps réel. La diffusion ne pourra se faire, dans de telles conditions, que par l'intermédiaire d'un casque, ce qui n'est pas vraiment un inconvénient quand on considère que l'objectif de cette démarche est la sonorisation d'environnement en réalité virtuelle. Les instruments virtuels sont joués par l'intermédiaire d'une interface MIDI. Une interface graphique permet d'agir sur la taille de la salle, et d'effectuer des mouvements et réorientations des objets par rapport à l'auditeur. Ainsi, la distance, les angles relatifs d'élévation et d'azimut entre la source et l'auditeur sont contrôlés graphiquement, mais il est aussi possible d'entrer directement les valeurs par l'intermédiaire d'une interface de programmation en Lisp. Le casque est muni d'un suiveur de tête qui

¹⁴⁷J. Huopaniemi, T. Hustilainen, M. Karjalainen, V. Valimaki, « Virtual instruments in virtual rooms- a real time binaural room simulation environment for physical models of musical instruments » dans *International Computer Music Conference*, San Francisco, International Computer Music Association, 1994, p. 455-462.

¹⁴⁸ Ces techniques d'auralisation permettent la localisation azimutale d'une source sonore virtuelle.

évalue la position de la tête du spectateur par rapport aux objets observés et écoutés, les données numériques étant envoyées au système.

Malgré son efficacité, cette simulation soulève bien des problèmes quant à sa généralisation et son utilisation à des fins purement musicales. La modélisation du rayonnement des instruments est issue de mesures expérimentales, ainsi, pour chaque instrument, ce processus devra être réitéré, établissant une dépendance des recherches et des résultats scientifiques. De plus, ceci impose inévitablement de s'inscrire dans une stricte réalité, une quelconque flexibilité et généralisation ne peuvent véritablement pas être escomptées. Ainsi, de nouvelles structures, voire de nouveaux instruments, ne pourront être affectés d'un rayonnement propre.

8.3. La diffusion des sons synthétisés

Un autre problème vient du fait que la diffusion des sons synthétisés par des haut-parleurs, est en totale contradiction avec la démarche de la synthèse par modèles physiques. En effet, les haut-parleurs ne diffuse pas du tout le son comme un instrument réel. L'inadéquation de la synthèse d'un son et de ses moyens de diffusion est un obstacle à l'appréciation de la modélisation, car il est parfois difficile de distinguer les erreurs engendrées par le modèle lui-même, de la faiblesse des moyens de diffusion. La nécessité du développement des recherches autour du rayonnement des instruments existants s'est fait donc très vite sentir pour résoudre le problème de la diffusion de sons synthétisés.

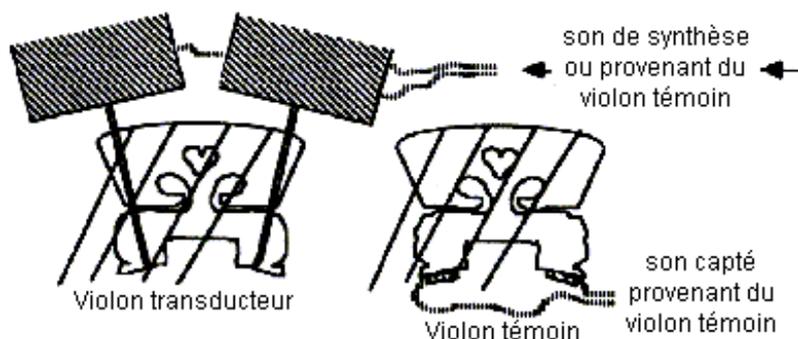


Figure 54 : Schéma d'un violon transducteur servant de moyen de diffusion d'un son synthétisé par ordinateur, et d'un violon témoin sur lequel on capte le signal afin de le comparer au son synthétisé.

Des solutions ont été élaborées pour résoudre dans l'immédiat le problème de la diffusion des sons synthétisés. Par exemple, pendant le développement des algorithmes de synthèse modale, J.-M. Adrien a conçu un système en vue d'une étude des caractéristiques

de rayonnement des instruments à cordes¹⁴⁹. Sa technique consiste à utiliser le corps d'un instrument réel comme transducteur. Les sons stéréo obtenus par synthèse sont communiqués sous forme de vibrations, aux pieds du chevalet d'un violon, après une conversion du numérique en analogique, et un passage à travers un système d'amplification à Haute-fidélité et de mélangeurs B&K 4810 (voir Figure 54). Adrien précise qu'il est nécessaire, avec un tel dispositif de bloquer les cordes réelles du violon et de remplacer dans la simulation le corps de l'instrument par une structure vibrante ou non d'impédance infinie, ceci pour éviter toute interférence entre le son simulé et l'instrument réel. Pour avoir une base de référence ou pour effectuer une vérification, la vibration d'un instrument réel peut être captée par l'intermédiaire de transducteurs piézo-électriques en céramique, placés entre les pieds du chevalet et la caisse de l'instrument (voir Figure 54). Ce procédé était malheureusement limité au cadre expérimental.

L'excès de réalisme de ces « sur-simulations » peut cependant devenir d'une totale aridité, et condamne bien des chemins plus fertiles et verdoyants. Cette démarche n'autorise qu'à singer la réalité sans vraiment la dépasser, elle en devient même l'esclave, si elle ne se réserve quelques « échappatoires » vers d'autres physiques. Des approximations, même parfois grossières sont, dans certains cas, préférables à un avilissement à une réalité physique qui, de toute évidence, paraît pour l'instant insondable. Ainsi, même si la spatialité interne aux modèles, les écoutes sur la matière vibrante, et les reconstructions des structures perdent en réalisme par rapport à une perception en trois dimensions d'instruments virtuels pourvus d'une modélisation de leur rayonnement, elles gagnent en souplesse, en fertilité, et seront plus propices à un travail et une recherche plus proprement artistiques.

9. Laisser l'œuvre disparaître ou provoquer son obsolescence.

La perpétuelle évolution des technologies, en matière de synthèse sonore est un attrait puissant pour le praticien, mais elle engendre des problèmes que nous n'ignorons

¹⁴⁹ J. -M. Adrien, « The missing Link : Modal synthesis » dans G. De Poli, A. Picciali, and C. Roads, *Representation of the musical signal*, Cambridge, Massachussets, MIT press, 1991, p. 287.

plus. Si les sons et les œuvres sont actuellement assurés d'une bonne chance de conservation, les dispositifs qui ont permis leur création, en revanche, ne le sont absolument pas. Pire, la création de techniques toujours plus performantes entraîne l'obsolescence des précédentes et, avec elle, celle des œuvres qui en sont issues.

L'hypothèse a été émise, que la fixation de ces sons et de ces œuvres serait la cause de leur tendance à se démoder. Dans ce sens, nous pourrions penser que l'utilisation de la synthèse par modèles physiques, pourrait préserver l'œuvre d'un tel sort. En effet, en conservant non pas le son mais le modèle qui est susceptible de l'émettre, nous offririons la possibilité de produire une autre exécution de l'œuvre. De plus, le modèle serait susceptible de bénéficier d'une augmentation du taux d'échantillonnage, d'une amélioration des algorithmes de synthèse ou, dans le cas de la synthèse modale, d'une augmentation du nombre de modes calculés. Malheureusement, ceci n'est possible que, tant que l'on peut compiler à nouveau les programmes. Si la capacité de calcul disparaît, effet pervers du renouvellement technologique, seule la fixation du son même reste possible pour en assurer la pérennité, tout en bloquant la possibilité d'un travail renouvelé. Ainsi, les œuvres produites par modélisation physique ne semble pas promises à un avenir meilleur, condamnées comme les autres à l'oubli ou à l'obsolescence.

CONCLUSION

La synthèse par modèles physiques offre une nouvelle manière de produire des sons, plus vivants et plus proches d'une conception événementielle et gestuelle de la musique. Malgré les concessions que nous imposent les limitations de l'informatique tant en ce qui concerne le temps réel que la finesse de définition des sons, les résultats sont néanmoins convaincants et font l'objet de compositions musicales originales. La possibilité de créer des chimères et des hybrides fait l'originalité et la force de cette technique.

Il est regrettable que les personnes proches de l'ACROE et utilisant le programme Cordis, n'aient pas pu répondre à mes demandes de renseignements. Je n'ai donc, dans mon étude, proposé aucune œuvre réalisée avec ce logiciel. Pourtant ces œuvres existent¹⁵⁰ mais il ne m'a pas été possible de les écouter. Les personnes qui y ont eu accès s'accordent toutes pour dire que les résultats obtenus sont très proches de ceux des autres techniques, j'espère donc que cette lacune ne nuira pas à la précision et la clarté de mon propos.

Ce programme, Cordis, tire son originalité de son aspect multimédia mais fait l'objet de créations parfois exclusivement musicales. Modalys, quant à lui, évolue très vite et est utilisé dans des œuvres de plus en plus nombreuses. Entre 1994, année de création de *Dans la Distance* de François Nicolas, et 1997, celle de *Fleurs et Insectes* de Guillaume Loizillon, le temps de calcul des sons a considérablement diminué et Loizillon a de ce fait beaucoup plus apprécié le programme que François Nicolas. Modalys est conçu à l'intention des compositeurs et toutes les améliorations dont il fait l'objet vont dans le sens d'une plus grande facilité et souplesse d'utilisation. La synthèse par guides d'ondes, en revanche, n'a pas été intégrée à un programme simple d'utilisation. Le compositeur doit être également technicien et créer son propre programme. David Jaffe nous a prouvé que les résultats sonores pouvaient être convaincants. La grande économie de cette technique est son point fort et a déterminé son utilisation dans les synthétiseurs commerciaux. Ces derniers favorisent la diffusion des modèles physiques est encouragent leur vulgarisation mais il est dommage qu'ils n'utilisent qu'une faible partie de leurs possibilités.

¹⁵⁰ Parmi ces œuvres, peuvent être cités : *Esquisse*, œuvre musicale et visuelle de Claude Cadoz, Annie Lucianni et Jean-Loup Florens ; *Rhizome* pour harpe seule et dispositif électronique de Hans Peter Stubbe Teglbjærg ; *La Natura delle cose* pour percussion et sons de synthèse en double stéréophonie de Giuseppe Gavazza.

Simplement par leur différence avec les techniques par modèle de signal, les modèles physiques induisent une nouvelle approche, une nouvelle façon d'utiliser le son et une manière événementielle de le penser, plus proche de nos habitudes musicales. Cette vision instrumentale, moins inhumaine et abstraite que les sonorités synthétiques, permet la reconstitution d'un geste et avec lui toute la finesse d'expression du jeu instrumental. Les paramètres utilisés, tout en étant des valeurs souvent ignorées du musicien (longueur de corde, densité du matériau), sont plus évocateurs que ceux utilisés en synthèse par modèle de signal (branchement des oscillateurs en FM...). Les possibilités d'hybridation et de création de chimères apportent une totale nouveauté et permettent la création de sons inouïs jusqu'alors.

Cependant, nous ne devons pas nous laisser emporter par notre enthousiasme : cette technique ne révolutionnera pas le monde de la musique, de plus elle ne peut pas tout faire. Les sons paradoxaux de Risset sont, par exemple, l'apanage exclusif des techniques par modèle de signal, de plus, les modèles ne sont pas si simples et instinctifs à contrôler que l'on semble le croire à priori. La volonté de donner la sensation d'une origine physique du son est un parti pris qui n'est pas accepté de tous, et désormais la possibilité d'obtenir des sons réalistes, vivants et musicaux rendra l'utilisation de sonorités synthétiques beaucoup plus signifiante et révélatrice d'une intention particulière.

Les recherches sont en cours pour élaborer une technique d'analyse / resynthèse mais elle reste encore à inventer. L'utilisateur est obligé pour l'instant de procéder par imitation des instruments avant de s'éloigner du modèle réel et de pouvoir inventer. Le problème du contrôle du modèle et des retours auditifs, tactiles et visuels font l'objet de recherches qui se poursuivent mais aucune solution totalement satisfaisante n'a encore été trouvée. Il paraît nécessaire de délaissé certains aspects au profit des autres, et aucune solution globale ne semble pouvoir être trouvée.

De manière générale, l'évolution de la synthèse par modèles physiques ne peut se faire que grâce à l'évolution de la puissance des machines et seulement lorsque des solutions seront trouvées pour ces problèmes d'analyse / resynthèse, de rayonnement, de diffusion et de contrôle gestuel. L'ergonomie des outils et leur conformité aux règles de la psychoacoustique devrait permettre une utilisation plus simple et plus agréable. Il semble qu'il y ait beaucoup à attendre d'une interfécondation entre les diverses techniques de synthèse. Tout système de synthèse et de traitement devrait être pensé dans une perspective unifiante permettant de créer des modèles mêlant plusieurs techniques (par exemple,

excitation additive et résonateur physique), ce qui permettrait ainsi d'enrichir un modèle de signal ou au contraire de simplifier un modèle physique pour des besoins d'économie. Les recherches se poursuivent à l'IRCAM, à l'ACROE, au CCRMA de Stanford et dans d'autres laboratoires et universités : la modélisation physique est une technique encore jeune et son développement semble prometteur.

ANNEXE 1 : ENTRETIENS AVEC LES COMPOSITEURS

1. Entretien avec François Nicolas

François Nicolas a travaillé à l'IRCAM, et a collaboré au développement de Mosaïc, en apportant son regard de compositeur. A l'issue de ce travail, il a produit une œuvre, *Dans la distance*¹⁵¹, qui utilise des sons synthétisés par Mosaïc. Je suis allée l'interroger sur cette expérience.

Qu'est-ce que la synthèse par modèles physiques vous a apporté de plus que les autres types de synthèse ?

A dire vrai, je n'ai pas re-réfléchi à tout cela dans la perspective de cet entretien. Je suis maintenant assez loin de cela, dans le sens où je ne l'ai pas, premièrement, utilisée depuis cinq ans. Deuxièmement, dans la prochaine production que je dois réaliser à l'IRCAM, je ne compte pas non plus l'utiliser. Dans mon cas, le travail sur Mosaïc a été lié à un moment un peu particulier de mon travail de compositeur, mais ce n'est pas non plus exactement une constante. Ce sont des choses qui sont un peu pour moi... je ne dis pas « dépassées », ce n'est pas cela, mais disons plutôt achevées.

Je suis un peu obligé de vous expliquer l'histoire de mon rapport à Mosaïc pour que vous compreniez...

Je suis arrivé à l'IRCAM, pour participer à un atelier qu'organisait Marc Battier, il y a de ça, je crois, plus de dix ans. Les différents types d'activités de l'IRCAM, nous étaient présentées comme un menu, et dans un de ces types d'activités, il y avait tout ce qui concerne la synthèse. Là, effectivement, j'ai eu tout de suite l'oreille accrochée par la synthèse par modèles physiques, parce qu'il me semblait que c'était la manière de penser la synthèse, la plus proche du modèle instrumental.

Toujours est-il qu'il faut être capable d'intégrer dans nos catégories, dans notre manière de penser la musique, ces techniques qui nous sont proposées, non pas par les musiciens, mais par l'autonomie du développement technique. Il ne s'agit pas de les reproduire exactement, mais, pour créer, on est obligé de les penser à partir de la musique, et non à partir de l'informatique. Mon statut me permet de faire cela plus facilement, car j'ai une double compétence musicale et scientifique qui me permet de ne pas avoir peur de ce genre de travail. En revanche, certains compositeurs sont dans un rapport complètement extérieur à ces techniques. On leur fournit des outils. Ils se reposent sur leur assistant, écoutent le résultat, mais ils ne font pas le rapport entre ce qu'ils entendent et la façon dont

¹⁵¹ Voir annexe 1 § 4 (CD1 Plage 27).

cela est obtenu. Moi, ce qui me motivait, c'était de voir, à l'intérieur, comment cela était fait. De ce point de vu là, les modèles physiques sont très intéressants puisqu'il s'agit au départ de reproduire la chaîne musicale qui engendre le son. Et parce qu'à mon avis, le son musical est généré par un corps à corps¹⁵², c'est à dire un rapport entre le musicien et le corps de l'instrument. D'ailleurs, j'aime bien appeler « corps musical », ce corps à corps, cette espèce de mélange ou d'hybride qui intervient. Je soutiens que c'est là 'le son musical'. De ce point de vue là, n'importe quel son n'est pas musical. Il l'est, pour autant qu'il soit la trace de ce corps à corps qui se trouve, ensuite, non pas amplifié mais projeté.

La synthèse par modèles physiques tente, justement, de reconstituer le son, en remontant jusqu'à son origine sous forme de corps à corps, puisqu'elle vise à modéliser l'interaction entre deux corps physiques. Cela, m'a aussitôt frappé, à la fois comme approche générale et, d'autre part, dans ses résultats concrets, puisque l'un des grands aspects de la synthèse par modèles physiques, que vous connaissez sans doute, c'est qu'elle génère des transitoires. Donc, au lieu de générer des nappes sonores qui m'ont, personnellement, toujours paru sans aucun intérêt, elle génère des sons pourvus de transitoires. Et nous savons, car c'est un phénomène physique bien connu, que nous reconnaissons un son par son début et par sa fin, et non pas par sa partie entretenue.

Il se trouve que les sonorités étales m'ont toujours ennuyé au plus haut point. Par exemple, j'ai fait beaucoup d'orgue lorsque j'étais jeune, j'en refais d'ailleurs maintenant. Et bien, les sonorités de l'orgue, où il y a des grandes tenues, m'ont toujours paru ennuyeuses. Pour autant que l'orgue soit un instrument intéressant, ce que je crois, c'est précisément là aussi dans ses attaques et dans la possibilité de jouer de cette dimension là.

Il faut bien voir que la synthèse sonore, la plupart du temps, génère des nappes sonores, c'est à dire, secrète ce qu'Adorno avait appelé le « sentiment océanique ». Vous baignez dans une espèce de marée de sons. Pour moi, cela est inacceptable. C'est vraiment la dissolution de la pensée, de la musique en tant que pensée, car au lieu d'être assis droit à essayer de saisir la proposition qui vous est faite, vous vous enfoncez dans votre fauteuil et vous vous laissez aller. Ce qui est le droit de chacun, mais la musique n'a plus rien à voir avec la pensée dans ce cas là. La synthèse sonore a une certaine propension à se répandre et à générer des espèces de vagues qui n'en finissent plus, qui ne sont plus contrôlées ou coordonnées comme peuvent l'être les sons instrumentaux par la discipline de l'écriture. Dans le cadre de l'écriture, vous n'allez jamais mettre, sauf cas exceptionnel, 10 rondes liées à la suite. Alors qu'avec la synthèse sonore, vous travaillez très spontanément dans des valeurs proches de 10 rondes à la suite. Ceci est, pour moi, une horreur, et provoque chez moi une très grande répulsion auditive et quasi-physique.

La synthèse sonore par modèles physiques ne provoque pas du tout cela, car, au contraire, elle travaille sur ce qui se passe quand un corps en rencontre un autre, par exemple quand un marteau rencontre une corde. De manière assez directe, on obtient des résultats intéressants parce qu'ayant une vitalité proche de celle à laquelle on est habitué dans le monde instrumental.

Parmi toutes les possibilités proposées, offertes dans le cadre de ce stage de formation, je me suis rapidement intéressé exclusivement à Mosaïc. Je suis rentré dans l'équipe, au moment où le procédé était en train de se mettre au point. C'était en cela une

¹⁵² Pour une exposition détaillée de cette opinion, voir : Nicolas, François, « La synthèse sonore déplace-t-elle l'acte de composition ? » in *Dans la distance : Cahier d'exploitation*, Marc Battier ed., Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, p. 72.

époque très intéressante. L'équipe comprenait un ingénieur, physicien, Jean Marie Adrien, un informaticien, Joseph Morrison, et un compositeur, moi-même. J'ai travaillé en tant qu'oreille extérieure à la technique. Cette dimension de recherche m'a beaucoup intéressé, à cause de l'acuité que cela entraînait dans l'audition. On écoutait ces sons vraiment comme on aurait écouté un instrument et pas du tout comme quelque chose de synthétique. Par exemple, j'ai fait beaucoup d'études à l'époque (y compris au niveau physique, des équations, etc.) sur les transitoires de cordes, et c'était passionnant de voir comment, dans des séquences extrêmement brèves, les sons pouvaient être très différents selon le réglage des paramètres physiques. C'était pour moi, comme une manière d'aiguiser mon oreille à ces phénomènes.

Au début, il y avait deux dimensions dans la synthèse physique, qui étaient, premièrement, de reproduire les instruments, ce qui en soi, n'est pas très intéressant, mais est une manière d'apprendre à discerner ce que l'on aime dans les instruments (vous êtes ainsi amené à préciser ce que vous appréciez, au sens musical du terme, dans la sonorité d'un violon, dans la sonorité d'un piano, etc.). Deuxièmement, après cette première étape, vous êtes censé pouvoir faire des instruments « extraordinaires » : un violon de 50 kilomètres de haut, avec 2000 cordes ! Ou bien, vous pouvez jouer d'un archet au milieu d'un gong... vous pouvez faire un certain nombre de choses difficilement réalisables dans la physique naturelle. Cependant, ces instruments « extraordinaires » ne m'ont pas paru bouleversants. Je n'ai pas vu de débouchés de ce côté là, mais peut-être est-ce un problème d'imagination qui m'est propre.

Mais, surtout à l'époque où j'y travaillais, car je crois que ça a beaucoup évolué depuis, c'est la question du temps réel et du temps différé qui a été un élément de blocage. A cette époque, il y a presque dix ans, le temps était vraiment très différé. Vous lanciez votre calcul et vous reveniez le lendemain pour avoir le résultat. Cela est acceptable tant que vous êtes dans la recherche, cependant, lorsque je suis rentré en production, l'exigence du temps réel est devenue pour moi absolue. Un autre petit inconvénient, qui pour moi n'en était pas tellement un, c'est qu'il fallait coder le modèle en langage *scheme*, une variante de *Lisp*, ce qui était, il faut l'admettre, assez ingrat, parce que, par rapport aux autres interfaces, il est beaucoup moins intuitif. Cependant, il a simplement fallu que je m'y habitue et le principal problème restait, pour moi, celui du temps réel et du temps différé car le coût en temps de calcul était assez lourd.

C'est là qu'il faudrait faire une digression sur la question des modes. *Mosaïc* est une synthèse par composantes modales. Cette dimension modale est assez particulière, assez intéressante, dans ce logiciel là, et mérite d'être connue et comprise. L'intérêt que j'ai eu pour la synthèse par modèles physiques tient précisément au fait que l'objet était modélisé dans ce cadre là, et cela aurait été dans un autre, je ne pense pas que j'y aurais mis le même intérêt. Dans *Mosaïc*, vous calculez la façon dont la structure bouge dans son ensemble, cette façon de bouger est décomposée en différents modes de plus en plus complexes. Sur une corde, le processus est simple et les modes correspondent en gros aux harmoniques, mais pour une plaque cela devient beaucoup plus complexe. Un mode est « une fréquence à laquelle tous les points de la structure bougent à la même vitesse ». Le calcul de ces modes peut être assez compliqué car il faut des matrices assez larges, mais dont la taille est proportionnelle à la manière dont vous discrétisez votre surface. Le résultat c'est qu'en temps de calcul cela peut assez vite devenir pénible. Les autres synthèses physiques peuvent être, je crois, plus efficaces en temps de calcul mais le sont

moins, soit en terme de qualité sonore, soit en généralité. L'intérêt de la synthèse modale, est qu'elle est applicable à de nombreuses structures différentes, alors qu'une autre technique pourra modéliser une corde de façon beaucoup plus économique mais ne pourra absolument pas réutiliser la même simulation avec une plaque, pour laquelle le processus sera totalement différent.

Mais, pourquoi cette importance du temps réel ?

Pour moi le temps réel était absolument essentiel car il restituait l'écriture. Il se trouve, pour moi, que la dimension de l'écriture en musique a toujours été essentielle. D'ailleurs, plus j'y réfléchis et plus je me renforce dans ma conviction de son importance extrême. Il se trouve qu'en ce moment je réfléchis beaucoup sur des questions de logique en musique et je viens à penser que l'écriture est le transcendantal de la musique au sens Kantien du terme. Pratiquement, l'écriture a pour moi comme vertu extrême qu'elle permet de ne pas œuvrer directement sur le son, comme un sculpteur travaille sa glaise, ce qui pour moi, est le cauchemar et même l'horreur. C'est insupportable, car j'ai vraiment le sentiment de ne plus pouvoir penser, d'être complètement collé au matériau dans toute sa « vulgarité ». Je suis, à ce moment là, complètement happé par lui et je n'ai plus de distance suffisante, d'écart, de faille, de coupure pour pouvoir me situer face à lui et m'en rendre maître. Au lieu de me rendre maître du matériau, c'est le matériau qui se rend maître de moi.

En musique l'opérateur est la lettre musicale, la note, l'écriture. C'est une notion d'autant plus importante qu'elle est à l'origine de mon désir de composer. Dans mon histoire, à un moment donné, j'ai fait du jazz. Là, j'étais assez proche de cette manière directe de travailler le matériau et, précisément, mon envie de devenir compositeur a été motivée par ma volonté de rompre avec ce régime, de mettre la table de travail entre le son et moi. Avoir un son en tête est tout à fait différent que de l'avoir physiquement dans son oreille. On raconte d'ailleurs souvent des inepties sur l'écoute intérieure. L'écoute intérieure n'est qu'une imagination. Imaginer tenir la main de sa femme et l'avoir physiquement à ses côtés, cela n'a rien à voir. Certains affirment : « l'écoute intérieure me suffit », mais dans ce cas, ils ne sont pas en contact direct avec la matière physique sonore. Donc, l'écriture est pour moi essentielle, sinon je ne peux qu'étaler du son, tartiner, improviser au piano, mais je ne peux pas composer.

Dans cette œuvre (Dans la distance), je devais évidemment utiliser l'électroacoustique, cela faisait partie du cahier des charges. Ne pouvant pas utiliser Mosaïc en temps réel, j'ai alors pris un autre parti sur un autre type de synthèse, qui n'en est pas tout à fait un. Celui-ci consiste à empiler des petites briques sonores, échantillons d'une seconde, grâce au logiciel Max. Ces briques ou échantillons sont, soit générés par des modèles, par exemple certains ont été générés par Mosaïc, soit enregistrés d'après des sons naturels (piano, voix). Elles sont ensuite empilées à grande vitesse, c'est ce que l'on peut appeler 'synthèse granulaire'. Cette technique est extraordinaire car vous constituez au départ votre réservoir de petites briques, puis vous constituez votre empilage. Vous obtenez des sonorités qui peuvent être vraiment fabuleuses. C'est un peu comme un grand orgue, vous utilisez cela un peu comme quand vous tirez les jeux dans un orgue. Ce qui est surtout intéressant c'est que vous l'écrivez, vous décrivez la structure de votre matériau, dans le langage de Max, qui possède à un certain niveau, une sorte d'abstraction. Quand vous utilisez avec des notes vous réalisez une structure : vous n'écrivez pas le son, juste une structure. L'écriture informatique avec Max, dans ce type de synthèse granulaire, est du

même genre. Un des intérêts majeurs est, qu'à partir du moment où vous avez une structure, vous pouvez changer vos grains. Évidemment, cela ne produit pas tout à fait le même résultat, mais vous vous rapprochez d'une situation proche de l'interprétation. Par exemple, Beethoven écrivait pour un piano forte une structure qu'est la partition. Si l'instrument évolue, on réutilise la même structure, cette partition, et il en reste toujours quelque chose.

Pour Dans la distance, j'ai travaillé avec un système de grains échantillonnés mais imaginez que dans 10 ou 20 ans tout ceci soit bouleversé pour une raison ou pour une autre, qu'on ait de meilleures sonorités... cette structure là est réutilisable comme l'est une écriture.

Voulez vous dire que vous n'êtes pas attaché au timbre ?

Si, dans ce cas là le timbre est essentiel. Vous n'obtenez pas le même résultat si vous empilez des sonorités de violoncelle, de flûte ou même des voix que j'utilise à un moment donné. Ceci fait partie de la structure, mais c'est un peu comme une partition d'orchestre : quand Mozart écrit « flûte », il est attaché à la sonorité, n'empêche que les flûtes ne sont pas forcément les mêmes, les manières de jouer non plus. Lui ne fixe pas telle ou telle sonorité de la flûte, il fixe une structure nommée « instrument flûte ». Dans les grains, vous fixez certains grains de violoncelle, flûte, etc. Pour réaliser ces grains vous utilisez un répertoire que vous entrez dans la machine. Mais on pourrait changer, non pas le violoncelle pour une flûte, mais imaginez qu'au lieu d'échantillonner à 48000 par seconde, dans dix ans on échantillonne cela à dix fois plus, vous reprenez votre même structure avec des sonorités du même type mais qui seraient échantillonnées autrement.

Donc, ce n'est pas l'indifférence totale, c'est qu'au lieu de prendre un son qui est complètement arrêté puisqu'il est figé une fois pour toutes, vous l'indexez par un nom générique, comme on met « flûte » et vous ne précisez pas si votre flûte est en plastique ou autre, vous ne vous préoccupez pas de ces questions-là.

Donc vous avez une écriture au sens musical du terme. Ce n'est pas la même car elle ne se fait pas en notes, mais c'est une écriture. Les deux gros intérêts pour moi, c'est que vous travaillez sur l'écriture donc vous êtes à distance. Évidemment vous êtes dans un studio donc vous entendez tout de suite le résultat, là n'est pas la question... mais en entendant un son, on ne pense pas à le figer parce qu'il est satisfaisant (c'est un peu l'expérience que j'ai eue avec Mosaïc qui pour cela était très dure), mais au contraire on se demande comment on peut changer la structure, par exemple si je change ma densité de grain, qu'est-ce que ça donne. Donc, premièrement, vous êtes plus dans la logique de ce que, pour moi, composer veut dire. Deuxièmement, votre résultat reste ouvert à des réalisations différentes dans le futur, comme une partition.

Quelle utilisation effective avez-vous finalement fait de Mosaïc ?

A cette époque là, écrire pour Mosaïc, ce n'était pas possible puisqu'on n'avait pas le temps réel. J'ai quand même utilisé ce logiciel pour certaines sonorités, pour les grains, pour les sons de clavecin. C'était plus intéressant pour moi d'avoir un son de clavecin généré par synthèse physique que d'avoir un clavecin échantillonné. Pour ce clavecin, ce son de corde pincée, j'ai pris Mosaïc car je le connaissais bien, et parce que cela permettait tout de suite d'obtenir un type de grain plus intéressant que par les prises de son habituelles. Il s'agit là d'un usage un peu « bas de gamme » du logiciel dans le sens où il fournit des

échantillons de seulement 1 seconde. Les sonorités de percussions que j'ai utilisées sont aussi des grains obtenus par Mosaïc. Mais, sur une quantité de 48 grains environ que je pouvais utiliser, je n'en ai réalisé que 5 ou 8 de cette manière, le reste étant des sons échantillonnés.

Ceci est donc un premier usage que j'ai fait de Mosaïc. Sinon, sans temps réel je ne voyais pas très bien ce que je pouvais faire. Néanmoins, je l'ai utilisé, pour des raisons hétérogènes, d'une part parce que cela m'arrangeait d'avoir des sonorités plus continues, pour des raisons intrinsèques à la composition, et aussi pour des raisons d'attachement à Mosaïc : après tout le travail que j'avais fait dessus, je voulais voir, au maximum, tout ce que je pouvais en tirer. Je me suis un peu forcé, on va dire, à faire des sons « Mosaïc » un peu plus larges et non simplement des échantillons. Comme je ne pouvais pas travailler en temps réel, j'avais constitué une panoplie de sons « Mosaïc » plus longs, de percussions, qui dureraient 10-15 secondes. Chacun des sons avait quelque chose d'intéressant, mais cela n'était pas suffisant donc il fallait mixer le tout. Là, j'ai passé un temps très important en studio pour mixer ces sons, et en faire des sons « intéressants », c'est à dire qui m'intéressaient dans le cadre de la composition. J'en ai fait, je crois, trois qui dureraient 15 secondes. Ceci a vraiment été pour moi, le cauchemar, l'horreur, car je travaillais sur ProTools et je n'étais plus du tout dans le cadre de l'écriture, j'étais comme le sculpteur qui modèle sa glaise. J'ai eu l'impression d'un travail infini, c'est à dire qui n'en finissait jamais, où j'étais maîtrisé plutôt que de maîtriser. Je n'avais pas les opérateurs pour me tenir à distance et j'étais simplement à chaque fois obligé pour essayer de penser une sonorité, de l'entendre, ce qui est dramatique parce que cela dure des heures et des heures. A la fin vous êtes plus que dégoûté de vos sons. Vous n'avez pas d'autre moyen. Vous ne pouvez pas les penser par une écriture : il n'y en a pas. Donc, vous êtes obligé de vous les renvoyer, d'être collé à eux. Cela a vraiment généré chez moi un dégoût énorme de ce principe, et puis l'impression que je n'arrivais plus à m'en défaire. Il n'y avait pas de temps réel, pas d'écriture possible, et je me retrouvais avec ces sonorités là à faire du mixage comme je ne voulais pas en faire.

Cette sensation d'infini est quelque chose d'important car l'autre chose essentielle dans l'écriture c'est que c'est un opérateur fini. Quand vous écrivez, vous employez des notes, et même si vous rassemblez tous les symboles de la planète, ces signes forment un stock fini. Par définition, c'est discret, en fait c'est dénombrable. Ceci est vraiment extrêmement précieux pour la pensée parce que quand vous êtes devant un son même d'une seconde, très vite vous êtes devant, absolument l'infini. Si vous rentrez dans sa décomposition, vous êtes devant un puits quasiment sans fond. Très vite vous perdez vos repères. Par exemple, vous changez un petit bout d'attaque, vous regardez cela à l'écran, vous ne pouvez pas savoir quel est le résultat, vous êtes obligé de réécouter. Chaque fois vous êtes confronté au fait de recoller à votre matériau. Vous avez une impression qui est infinie puisque vous n'avez pas de lettres pour le discrétiser.

Dans cette œuvre qui dure 20 minutes, il y a beaucoup de parties électroacoustiques. Il y a 18 minutes d'électroacoustique, et Mosaïc ne m'a servi que pour moins d'une minute en ce qui concerne ces sons d'une certaine durée, mais il intervient pour les grains à d'autres moments.

Maintenant qu'il y a possibilité de travailler en temps réel, pensez-vous, prochainement, refaire usage de cette technique de synthèse ?

Je pense que les modèles physiques doivent être, maintenant que l'on s'est beaucoup rapproché du temps réel, plus utilisables, mais je n'en ai pas d'expérience récente. Cependant, pour ma production l'année prochaine, j'ai d'autres priorités. Je vais travailler à l'amélioration des moyens de diffusion que je trouve insatisfaisants pour l'instant. Cette production sera donc centrée sur un autre mode de diffusion qu'est la boule de haut-parleurs. Je n'ai pas envie de m'encombrer de trop de questions, donc, j'utiliserai la synthèse granulaire qui est vraiment très souple et je me concentrerai sur cette boule. Je ne profiterai pas de cette occasion pour retravailler la synthèse modale, mais si j'avais à le faire, il faudrait que je revoie l'état de Mosaïc. Et, à ce moment là, j'en referai usage, sous l'hypothèse que maintenant il y ait des dispositifs d'écriture qui permettraient de discrétiser, de se tenir à distance, et de réfléchir sur l'écriture elle-même.

Pour vous donner une idée de ce pouvoir que l'on ne peut obtenir que par l'écriture voici un exemple : avec la synthèse granulaire, je préparais le matériau, mais je pouvais travailler les contrastes chez moi. J'avais une même structure puis je décidais d'utiliser des sons d'un certain type, mettons, des sons de cordes frottées, puis, à un autre moment, j'utilisais uniquement des sons de cordes pincées ou des voix, etc. je travaillais déjà des grandes structures : c'est une manière de penser la musique.

Quand vous n'avez pas cela, vous êtes pris dans l'infini, en plus qui colle... le son peut ne jamais s'interrompre, il a une tendance à se répandre. Si vous avez une belle sonorité, pourquoi l'interrompre ? Une fois que vous êtes installé dedans vous pourriez bien y rester, et puis cela se répand, se répand... Et comment arriver à penser le contraste entre ceci et l'autre structure que vous pouvez faire ? Vous ne pouvez pas, et vous êtes à chaque fois ramené à votre matériau.

Pensez-vous que la synthèse par modèles physiques facilite la fusion entre partie synthétique et partie instrumentale dans les œuvres mixtes ?

Oui, absolument, pour deux raisons. Premièrement, parce que le son, dans la synthèse par modèles physiques, est lui-même conçu comme l'effet d'un corps à corps. Encore une fois, je pense que le son musical est tel.

Un autre de mes axiomes c'est que je ne suis pas pour la théorie des deux mondes, la « doxa » d'aujourd'hui, selon laquelle il existe deux mondes : le monde des instruments et le monde de l'électroacoustique. La plupart des compositeurs le pensent comme cela, c'est à dire qu'on vous expose de l'électroacoustique - premier monde - on vous expose ensuite de l'instrumental - deuxième monde - et puis un passage de l'un à l'autre, une confrontation est envisagée. Cela, je ne le veux pas, parce que je pense qu'il n'y a qu'un monde de la musique.

Il y a deux façons de répondre à la question des deux mondes, il y a celle de l'itinéraire qui essaye de rapprocher la musique des sonorités électroacoustiques, de considérer que l'écriture traditionnelle n'a pas tellement d'intérêt et qu'il faut que l'orchestre s'aligne sur les sonorités électroacoustiques. Je soutiens la proposition absolument inverse, qu'il faut arriver à organiser, à structurer tout ce monde de l'électroacoustique selon des catégories musicales. Ce qui permet de résoudre ce problème, c'est la catégorie de l'image. Je suis venu à penser que ce qui sortait des haut-parleurs n'était pas vraiment un son musical, mais l'image d'un son musical. Ce n'était pas exactement de la musique mais

l'image de la musique. Il fallait absolument considérer tout cela comme un même monde. Il y a donc deux manières de réduire le problème selon qu'on l'attaque par un côté ou par l'autre.

Je suis tout à fait contre le thème actuel qui est de penser qu'il y a un monde actuel et un monde virtuel, ce sont des balivernes, il n'y a pas de monde virtuel. Il n'y a rien de virtuel. Simplement, il y a des images et des choses qui n'en sont pas. Un monde est une chose, capable d'inclure à l'intérieur de lui-même, des images de lui-même. Ce « monde de l'électroacoustique » n'en est pas un. Il est juste l'image de la musique que vous pouvez composer. Vous pouvez composer un monde qui comporte à l'intérieur de lui-même ses propres images. Encore faut-il que ces images soient « intéressantes ». Et là ces images me semblent justement intéressantes car ce sont des images directement de la musique puisque se sont des images de corps de corps. Alors que j'aurais plus de mal à intégrer dans une œuvre musicale un mélange de sons musicaux et d'images de sons qui ne seraient pas musicaux (des tracteurs, des gens en train de parler). Je ne dis pas qu'il ne faut pas le faire, mais moi je ne le fais pas. Bien sûr, j'introduis des foules dans *Dans la distance*, mais pour les voix, c'est un peu différent car elles relèvent d'une habitude musicale, et elles portent le texte : les voix sont des corps.

Donc, la principale raison de la facilité d'une fusion entre modèles physiques et instruments, c'est parce que c'est un corps à corps. Ce n'est pas exactement pareil parce que c'est une image, il y a une sorte d'interface supplémentaire, mais la structure, derrière, est la même.

Deuxièmement, parce que l'on peut espérer, quand il y aura le temps réel, se rapprocher du point de vue de l'écriture, d'une écriture musicale plus traditionnelle. Sur la question de la double écriture, le point qui était essentiel c'est : il faut que ça s'écrive. Mais, cela ne s'écrit pas de la même manière alors cela pose quand même un problème. Dans la partition de *Dans la distance*, il y a une partie instrumentale en haut et une partie électroacoustique en bas. Il se trouve que j'ai, en même temps, mis une couche supplémentaire qui est une couche MIDI. J'ai traité ma synthèse granulaire comme un instrument jouant des hauteurs MIDI, donc jouant des notes. Le gros intérêt de l'informatique c'est que c'est un peu plus compliqué que cela, parce qu'à une note vous n'associez pas simplement un type de synthèse granulaire mais vous pouvez lui faire faire d'autres choses plus subtiles. Enfin, j'ai gardé et contrôlé tout cela par un niveau de structure musical habituel, c'est à dire une partition. Il y avait derrière cela, dans l'ordinateur, la structure en terme de synthèse granulaire (à tel moment donné on empile telles briques, etc.). Ce n'était pas complètement déconnecté non plus. On pourrait imaginer, à terme, avec la synthèse physique, que l'on se rapproche beaucoup de l'écriture traditionnelle.

Vous qui vous intéressez tant au temps réel, je suppose que les travaux sur les contrôleurs gestuels vous intéressent ?

J'ai vu ceux proposés par Claude Cadoz, il y a un certain temps. Cela semblait tenir plutôt du bricolage. A terme, je pense que cela peut être intéressant, mais ce que j'en avais vu était un peu élémentaire. Pour moi il n'était pas question d'utiliser des choses aussi grossières. Pourtant, c'est un point important. L'idée de réinstrumentaliser l'électroacoustique apparaît, par exemple, dans la musique techno par le fait qu'ils réintroduisent le « corps » à travers les gestes des mains sur la platine. Dans l'idée, il y a

quand même la réintroduction du corps humain comme étant en corps à corps avec autre chose, qui n'est pas exactement un corps physique. Quelque chose d'autre qui est l'électroacoustique.

En ce sens, toute l'orientation pour le contrôle gestuel attire ma sympathie de principe. Mais, encore une fois, tout ce que j'en avais entendu montrait que l'on en était encore au stade préhistorique. Ce n'est quand même pas évident d'inventer quelque chose de significatif à ce niveau, d'autant plus qu'il faut vraiment inventer. En techno, l'instrumentalisation de la platine a abouti à des gestes qui ne sont pas des transpositions de gestes musicaux traditionnels, mais des inventions complètes. En revanche, j'avais l'impression que les contrôles gestuels, au départ, étaient trop décalqués du geste instrumental habituel. Je pense que cela pourrait vraiment marcher s'il s'agissait de nouveaux types de gestes. Mais je ne me permettais pas de me prononcer sur ce qui se fait actuellement car je ne connais pas l'état des choses.

En tous cas, si dans cette production j'avais à reprendre cela, je crois que, par prudence, je ne m'y risquerais pas trop pour le moment, parce qu'il faut des virtuoses. Quand vous produisez, vous ne pouvez pas vous mettre sur le dos tous les problèmes du monde. Je trouve bien, chaque fois de me concentrer, dans la partie électroacoustique, sur un problème particulier. Tout ça pour dire : les gestes, oui, mais j'ai l'impression qu'ils sont encore à inventer.

Une interface gestuelle ou graphique n'est-elle pas un intermédiaire supplémentaire qui empêche de maîtriser véritablement la synthèse ?

Le problème du contrôle est double. Comme la langue chez Esope, c'est la meilleure ou la pire des choses. D'abord, qu'il y ait un intermédiaire par rapport au son, c'est plutôt une bonne chose, parce que c'est ce qui permet de couper du son, d'aller dans une écriture. Après, la question est : « Est-ce la bonne manière d'écrire ou non ? ». De toute façon, le principe de couper du son et de s'éloigner du traitement direct par des interfaces ou des dispositifs d'écriture, est un principe pour moi essentiel. Par ailleurs il y a un problème, que j'ai rencontré à l'époque, c'est que vous pouvez vous faire imposer des schémas qui sont présentés par les physiciens, les techniciens, comme des évidences, alors qu'ils n'en sont pas forcément. Les catégories d'écriture sont des catégories de pensée et non des catégories techniques. Je prends la « technique » comme un véhicule neutre en soi, la technique est ce qui ne pense pas, mais la science pense.

La note n'est pas une sur-catégorie technique, elle prescrit déjà une manière de penser le son. D'ailleurs, beaucoup de gens s'y opposent, au nom de cette pensée sous-jacente.

Vu la complexité technique, vu le nombre de passages du réel au modèle physique, si on rajoute en plus une interface, des déterminations très importantes interviennent encore, et au bout du compte, vous pouvez vous trouver confronté à quelque chose qui est très catégorisé. Le langage scheme, lui-même, n'est pas anodin, ce n'est pas un choix technique uniquement. Il y a aussi des orientations de pensée qui peuvent se jouer à ce moment là dans le type de langage, fonctionnel ou non. Cet outil, très catégorisé vous est, dans ce cas, toujours présenté comme étant naturel, comme étant technique, sans parti pris ou ayant des partis pris les plus naturels, les plus évidents (je ne dis pas que c'est faux, mais moi je ne crois pas en la nature, je veux dire, je ne crois pas que cela soit conformé par la nature, il n'y a de toute façon aucune raison de se couler dans le modèle de la nature).

Donc, vous pouvez très bien penser que votre rapport, qui est un rapport en pensée au son, est complètement canalisé, enfermé dans les catégories de l'interface graphique, qui n'ont rien d'évident parce qu'il y en aurait d'autres possibles, et vous vous sentez dans l'incapacité de faire un tout autre chemin, de remonter au modèle physique et de comprendre ce qui se passe...

D'un côté il faut couper, il faut interrompre, s'écarter du son, c'est mon parti pris d'écriture. Mais, de l'autre côté, les catégories d'écriture sont des catégories de pensée et non des catégories techniques. Soit vous assumez les catégories d'écriture qui vous sont données, sinon il faut aller y regarder, il ne faut pas prendre comme chose allant de soi, les interfaces graphiques qui vous sont proposées.

2. Entretien avec Guillaume Loizillon

Guillaume Loizillon est compositeur et professeur à l'université de Paris VIII. En 1996, il a écrit une thèse sur la synthèse sonore ou il traite de Modalys. Il a également composé plusieurs œuvres utilisant des sons produits avec Mosaïc et Modalys. Je suis allée l'interroger sur son travail concernant Modalys.

En dehors de Modalys sur lequel vous avez travaillé, connaissez-vous d'autres techniques de modélisation physique ?

J'ai travaillé principalement sur Modalys, les autres modes de synthèse physique je ne les connais que théoriquement. Il y a quelques années, j'ai rencontré Claude Cadoz qui m'avait montré Cordis mais je n'ai jamais pratiqué ce logiciel par moi-même. A part Modalys, j'ai manié Csound, un langage généraliste qui a quelques petites applications de modèles physiques. La technique de Karplus/Strong est la seule que je ne connaisse pas trop mal car je l'ai beaucoup utilisée. Quant aux autres, je ne connais que leur principe. Je n'ai pas de point de comparaison en ce qui concerne la pratique, la mise en œuvre. Quant à l'audition, en ce qui concerne les cordes, j'ai été assez impressionné par Claude Cadoz et son programme Cordis.

Pouvez-vous me parler de la mise en œuvre de Modalys en terme critique ? Quels sont ses défauts ?

Modalys est un langage, c'est du Lisp en plus ! Le Lisp n'est pas un langage extrêmement agréable du fait du parenthésage, de sa syntaxe absolument rigoureuse, mais au bout d'un certain temps ce n'est pas ce qui gêne le plus. Commencer avec une page blanche, ne pas avoir de petits dessins sur lesquels cliquer, ne me dérange pas.

Je sais que la critique générale faite à Modalys c'est sa difficulté de mise en œuvre, ce qui est relativement vrai. Pourtant, cela n'est pas trop gênant à l'usage. Moi, ce que je trouve un peu ennuyeux avec Modalys, c'est que, même en utilisant des machines assez puissantes - et je conçois très bien que cela engendre des calculs très profonds - le temps d'attente est très long. Je ne pense pas que le temps réel absolu, où le geste égale le son, soit indispensable, par contre, il faut qu'entre le moment du calcul et le moment de l'écoute, il y ait un temps suffisamment court, pour que psychologiquement on ait envie de poursuivre, pour qu'il y ait quand même une petite interaction. On lance le calcul, on attend, on imagine ce qui va se passer, cela se produit ou non, et on y retourne. S'il faut attendre une heure, on perd le fil de son travail. Il est vrai qu'entre le moment où j'ai commencé Modalys et maintenant, les machines ont considérablement évoluées. J'ai commencé Modalys - en 1996, ce n'est pas si vieux que cela - sur des machines qui n'étaient même pas encore des power PC, et j'ai le souvenir d'avoir attendu de 20 à 40 minutes pour un son. Je n'ai pas la dernière machine en date, j'ai ce qu'on appelle un G3 alors que l'on en est au G4, pourtant le calcul est maintenant de l'ordre de la minute.

A partir de là, comment expliquez-vous la faible utilisation de Modalys par les compositeurs ?

Il y a deux ou trois ans, à l'époque de ma thèse, j'ai fait une présentation à l'IRCAM et j'ai eu des conversations assez soutenues avec Francisco Iovino. D'après les échos que j'ai pu avoir, ce qui rebutait manifestement les compositeurs, c'était la page blanche, le Lisp, la programmation, et, il faut l'admettre, une relative complexité sur certaines des fonctions. Par exemple, il y a des contrôleurs - dans le sens « programmes » et non « objets » - que l'on écrit avec Modalys, et qui sont parfois assez délicats, ne serait-ce que conceptuellement et informatiquement, à comprendre. On ne rentre pas dans Modalys de manière intuitive, en une heure ou une demi-journée. Si on prend les exemples fournis, - en général c'est ce qu'on fait - et que l'on commence à modifier les paramètres, à ce moment là, par contre, cela va très vite. Mais, ce qui est intéressant c'est, à un moment donné, de se lancer, de se dire « j'ai compris les exemples », de prendre une page blanche et de commencer. A ce moment là, on s'aperçoit que l'on pensait avoir bien compris l'influence de chaque modification mais, qu'en fait, on était un peu passé à travers certaines lignes du programme qui ont leur importance. Il faut d'abord l'écrire et on finit par comprendre comment cela marche. Mais ce n'est pas tellement ouvert à l'intuition, c'est vrai.

Deuxièmement, une fois que l'on a fait ce travail, il ne faut pas penser qu'avec Modalys on va faire une pièce musicale. Avec Modalys, on fait du matériau et vu la capacité de mise en œuvre, le temps de calcul, on ne fait jamais une grosse séquence mais un petit bout ou juste un son. Ensuite, il faut trouver une idée d'exploitation ; si on fait de la musique purement électroacoustique, cela peut-être un échantillonneur permettant d'exécuter un montage de sons réalisé dans des logiciels de montage traditionnels (comme Protools, etc.).

Pourtant, j'avais vu, il y a deux ou trois ans, une œuvre entièrement réalisée avec Modalys, un peu conceptualiste, où une notion assez simple de corde avait été systématiquement exploitée. La corde faisait plusieurs dizaines de mètres et les paramètres étaient progressivement distordus. Le compositeur jouait sur la possibilité de créer virtuellement une corde très longue, de lui appliquer des tractions impossibles... C'est cela que j'aime bien dans Modalys : en dépit du côté austère de la page blanche cette synthèse permet vraiment de jouer avec l'imagination.

Malgré l'habitude, on ne sait pas toujours exactement ce que l'on va obtenir. Les modèles peuvent parfois n'émettre aucun son, non pas par erreur de syntaxe mais parce que le modèle qu'on a mis en marche vibre par exemple à 5 hertz et que l'on ne peut l'entendre. Au bout d'un certain temps l'imaginaire fonctionne cependant assez bien, du fait même de cette austérité, mais je crois, quand même, que les compositeurs qui n'ont pas un « background » informatique pur, comme ma génération, n'ont pas accroché.

Ce qui est vrai aussi, c'est que les compositeurs, comme moi, sont susceptibles, à un moment donné, d'accepter de s'intéresser à Modalys, de rentrer dans une chose un peu complexe parce qu'ils y trouvent un intérêt. Mais, cet effort ne peut pas être fourni chaque année. Les logiciels commerciaux, les ProTools et compagnie, sont certes des logiciels très puissants, très complexes, mais ils offrent la possibilité, au bout d'un quart d'heure de faire du son, de travailler : Modalys, non. Personnellement, Csound est apparu, il y a quelques années, j'ai appris ce langage et je l'ai bien aimé. Après, j'ai découvert Modalys. Cependant, j'ai renoncé à SuperCollider parce que l'on ne peut pas toujours apprendre des choses lourdes. Même Modalyser est un système un peu lourd, il n'est pas aussi intuitif que l'on veut bien le dire.

Existe-t-il des interfaces permettant une utilisation plus simple de Modalys ?

Sans être au fait des dernières nouveautés je peux dire que dans Modalys en tant que tel, il n'y a aucune interface, mais une page blanche. J'ai vu une démonstration assez convainquante, que je n'ai pas testée, d'une intégration de Modalys en temps réel dans Max MSP, avec la possibilité d'utiliser une interface, un contrôleur de souffle ou autre... En l'occurrence, il n'avait pas mis un contrôleur de souffle mais un clavier, cependant on aurait pu tout à fait en utiliser un, dans la mesure ou cela passe par un système MIDI.

Le problème que j'avais remarqué à l'époque - mais comme les machines évoluent tellement vite le problème sera bientôt résolu - était la limitation du nombre de modes calculables. Plus on réclame un nombre de modes important, plus l'objet que l'on crée, une corde, une plaque, est précis et plus la richesse du son est appréciable ; mais le temps de calcul augmente en conséquence et va à l'encontre du temps réel.

Il existe une couche supérieure de Modalys qui s'appelle Modalyser. Personnellement, j'ai Modalyser, je l'ai ouvert une fois ou deux, j'ai tenté de faire un son avec, mais comme je connais bien le mode texte je ne m'y suis jamais attaché. De plus, comme il y a une très belle couche graphique, le temps de calcul est encore plus long. Par contre, en dehors de mon cas personnel, je suis persuadé qu'à échéance, l'intégration de Modalys et des autres logiciels, interfacés sur des instruments, du matériel utilisant le souffle, des claviers, etc., est une idée à creuser qui va se développer et qui est, à mon avis, productive.

Ne pensez-vous pas que ces interfaces orientent la pensée du compositeur, voire imposent un mode de pensée ?

Cela est vrai de toutes les interfaces face à tous les langages. Le problème de toutes ces interfaces utilisateur, qui permettent un accès plus d'intuitif, plus rapide, du graphisme, est qu'elles sont forcément une limite par rapport au langage en tant que tel. Si on va au bout de cette idée, ce langage est, lui-même, encore un masque par rapport au langage machine. En même temps, on peut dire que ces interfaces qui vous guident quelque part, peuvent être perverties. Je pense, par exemple, à des choses très simples que sont les séquenceurs MIDI. Ils sont calibrés en 4/4 et 120 pour faire à priori de la chanson, de la musique pop, mais cela n'empêche absolument pas d'en faire autre chose. Je ne connais pas suffisamment Modalyser pour dire s'il oriente la pensée, mais dire qu'une interface impose un mode de pensée est excessif, ou alors l'interface est vraiment très mal faite. Qu'il propose un point de vue c'est certain, mais, sur un plan général, je pense qu'un langage, qu'une interface se pervertit, se subvertit bien aussi.

L'arrivée du temps réel, provoquera-t-elle un nouvel intérêt pour le système ?

A priori, oui, dans la mesure ou effectivement il y a plus de musiciens qui utilisent Max que Modalys. A posteriori, il faut voir... Le problème c'est que Max/MSP, bien que plus utilisé que Modalys, rebute quand même aussi. Ce n'est pas parce que Max permet l'utilisation de petites boites reliées par des fils, que les raisonnements que cela sous-tend ne sont pas compliqués, au contraire il permet la mise en route d'une syntaxe extrêmement complexe. Par contre, pour des compositeurs, des musiciens, déjà très affairés dans les domaines de la musique assistée par ordinateur, de la musique électroacoustique ou autre, cela me paraît une voix éminemment séductrice.

Parfois, à l'écoute des sons produits on se demande si on aurait pu obtenir la même chose avec d'autres techniques, quel est votre avis à ce sujet ?

Je pense qu'il n'y a aucun mode de synthèse, si vaste et si complexe soit-il, qui soit neutre au regard du son produit. On peut toujours se dire, en regardant Modalys, en comprenant ce qu'est Modalys, qu'on pourrait le faire autrement. Quand on y réfléchit bien - le problème est que, pour s'en apercevoir, il faut avoir Modalys, c'est un cercle vicieux - certes Modalys produit des modèles physiques, mais en dernière instance, que crée-t-il ? Il crée un fichier qui contient des partiels, des harmoniques, et il produit finalement le son par synthèse additive. Modalys calcule, à partir de paramètres physiques, des harmoniques ou plutôt des partiels et leurs évolutions dynamiques dans le temps. En fait, Modalys est un langage que l'on peut considérer comme une interface pour la synthèse additive. En effet, on accède au son d'une manière tout à fait différente de celle de Music 5 ou de Csound, où l'on spécifie les partiels un par un pour la synthèse additive. Je me suis amusé à calculer des sons avec Modalys, à les sauver sous forme d'un fichier texte présentant la liste des modes, puis à synthétiser le son lui-même avec un autre synthétiseur, comme Csound : le résultat est presque identique.

Mais, ce qui est vrai, c'est que malgré tout, il y a rapidement - c'est son défaut et sa qualité - une « couleur Modalys ». Ce que je trouve différent avec ce logiciel, ce ne sont pas tellement les timbres qu'il permet de générer mais les dynamiques qu'il permet de faire. Ce qui est intéressant dans Modalys ce n'est pas simplement la manipulation de matières, tensions, tractions, etc., ce sont toutes les conceptions réellement énergétiques qu'il y a dans le mode, dans la synthèse par modèles physiques, que l'on ne trouve pas dans la synthèse par modèle de signal. Énergétique, c'est à dire que virtuellement on injecte de la force et les sons sont des réactions dues à cette force. Je pense, par exemple, à des objets très simples sur le plan conceptuel que sont les rebonds. Avec le principe des ressorts, on simule deux objets qui se rencontrent, l'un possède une partie qui est molle, provoquant son rebond sur l'autre. Il y a alors création d'objets dynamiques et rythmiques qui sont difficilement réalisables avec les synthèses par modèles de signaux. Là est la réelle autonomie de Modalys.

L'intérêt de modalys est-il de permettre et alors un contrôle plus instinctif ?

Certes, mais moi je n'ai pas cherché le réalisme par rapport à des instruments existants. Ce que je trouve intéressant dans Modalys, plus que l'imitation d'un timbre, c'est que cela permet, au niveau d'un son unique, de donner, de manière assez évidente, l'idée de la matière, du métal, du bois... Deuxième chose, cela permet de créer des dynamiques, des événements et non pas des objets. J'ai fait un développement à ce propos¹⁵³. C'est à dire que le son raconte un événement : cela roule, cela rebondit. Il y a un encrage dans la physique, au niveau de l'imaginaire. Par exemple, j'ai simulé un modèle de cordes qui s'entrechoquent, il y a un phénomène de rebond, qui pourrait faire penser à une règle que l'on met au bord d'une table et à laquelle on donne une impulsion. Il n'y a pas qu'un timbre. A la limite, le timbre pourrait être électronique bien qu'il rappelle une matière. Par contre la dynamique que l'on entend, est directement sortie de Modalys, il n'y a pas d'intervention de montage ou mixage, et je ne pense pas qu'avec un synthétiseur traditionnel, même avec un

¹⁵³ Voir G. Loizillon, *Modes de description des sons et synthèse sonore*, thèse de doctorat, Université de Paris VIII, 1995-96, p. 280-284.

langage de synthèse si puissant, on puisse arriver à faire cela. C'est la mise en œuvre des jeux de forces, de masses, de ressorts que l'on entend, au-delà du timbre. Ensuite ce que j'aime c'est aller dans des modèles plus utopiques. Avec Jean Claude Risset, on avait discuté du sujet « est-ce que l'on peut créer une physique non terrienne ». Une physique terrienne induit que, si on a lâché un objet, du fait de la gravité, il va forcément tendre vers le repos. On peut imaginer une physique où les objets rebondissent pendant des heures et des heures, où la pesanteur n'est plus la même.

Risset a dit¹⁵⁴ : « A première vue, utiliser l'ordinateur pour mettre en œuvre des modèles physiques peut sembler entrer dans l'avenir à reculons, comme disait Mac Luhan, puisque c'est chercher à reproduire ce qui existe déjà dans le monde acoustique. » Effectivement n'est-ce pas un retour en arrière, un retour à l'instrument ?

Oui, si vous voulez, c'est un retour aux instruments, mais je ne suis pas exactement d'accord avec cela. La limite du modèle physique, c'est la physique, c'est une tautologie. Dans le modèle de signal, comme on manipule les partiels un par un, effectivement, il n'y a plus de contrainte. Là, une contrainte existe à nouveau, mais en même temps « le retour à l'instrument » ne signifie pas grand chose pour moi car il n'y a pas eu de départ. Si les synthèses par modèle de signal avaient réellement bouleversé à ce point la perception des choses et les notions mêmes de ce qu'est le son musical, qu'elles avaient fait abandonner l'instrument, il y aurait un côté rétrograde et cette remarque aurait un sens. Par ailleurs, que la synthèse par modèles physique ait ses limites qui sont justement celles de la physique, c'est vrai, même Oratio Vagionne l'a dit. Cependant, la mise en œuvre d'un modèle de signal n'est pas non plus exempte de limitations, ne serait-ce que notre capacité à l'imaginer, qui est à mon avis la première.

Les partisans du studio ou du temps réel s'opposent toujours. L'utilisation de Modalys en temps réel pendant un concert, serait-elle, d'après vous, vraiment intéressante ?

S'il fallait, absolument que l'on me mette dans l'un des camps, je préférerais le premier. Je me moque du temps réel, personnellement, pourtant la musique « live » m'intéresse aussi. Je vais finalement, quand même, défendre l'autre parti. Je suis persuadé qu'à plus ou moins brève échéance, des synthétiseurs, des instruments en temps réel fonctionneront et seront utilisés en concert, et ce sera une bonne chose. Par contre, je ne comprendrais pas tout à fait l'utilisation de sons de synthèse par modèles physiques purement imitatifs, dans ce cas autant avoir le véritable instrument. Alors là, je vais revenir à mon dada : si c'est pour nous faire écouter une planète, qui n'est plus la terre et qui, en même temps, nous rappelle le connu, j'irai tout de suite voir, écouter cette musique là. Si c'est par commodité, pour substituer une harpe virtuelle à une vraie parce que c'est moins lourd à transporter, cela ne m'intéresse pas.

Modalys est également un bon moyen de traitement, on peut, par exemple, injecter dans un modèle, un signal audio. Cette excitation du modèle par un signal audio est même le premier processus qui fonctionne bien dans Modalys. Dans mes pièces, j'ai passé de la

¹⁵⁴ J.-C. Risset, « Modèles physiques et perception - modèles physiques et composition » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol. III, p. 713.

voix parlée dans une plaque et cela donne des couleurs à partir de timbres réels. Ce que j'ai entendu en temps réel avec MSP fonctionnait comme cela : il y avait des modèles de plaques, de cordes, et ensuite l'accès pouvait être un clavier, un micro en temps réel, etc. Moi, je pense que Modalys est suffisamment intéressant, même si on l'utilise en temps réel, pour ne pas perdre exactement ce que sont l'objet, le mode de résonance, le mode d'excitation, le mode d'écoute, les contrôleurs... Si on perd tout cela, pour en venir à certains synthétiseurs presse bouton, même de très haut niveau, c'est peut être un peu dommage.

A propos, avez-vous eu l'occasion de vous faire une idée des synthétiseurs commerciaux utilisant la synthèse par modèles physiques ?

J'ai essayé le VL1 de Yamaha qui est sorti il y a 4, 5 ans. Comme tous les instruments commerciaux qui sont orientés vers quelque chose - ce n'est pas un défaut en soi - le VL1 est manifestement dirigé vers l'imitation des instruments, assez satisfaisante d'après ce que j'ai entendu, et plutôt vers les styles jazz, rock ou musique de variété. Je n'émet aucun jugement là dessus. Techniquement, c'était une machine petite, chère et monodique. Le problème, c'est que les constructeurs commerciaux utilisent des titres ronflants pour désigner leurs machines et après examen on se rend compte qu'il ne s'agit pas vraiment de modèles physiques. Par exemple, je ne suis pas tout à fait persuadé que le VG8 de Roland utilise réellement des modèles physiques mais pas plutôt un échantillonnage amélioré. Moi, je ne suis pas du tout guitariste, mais je sais que mes amis guitaristes trouvaient cela extraordinaire, peut-être que cela l'était d'ailleurs.

Le VL1 utilise vraiment les modèles physiques, il faut l'admettre. Cependant - c'est un peu l'idée du DX7 - les algorithmes de modèles physiques sont déjà pré-figés. Mais, pourquoi pas ? D'ailleurs, on agit de même avec Modalys, on fait suffisamment de modèles que l'on fige un peu, puis on joue en temps réel. Les synthétiseurs commerciaux ont un impératif de temps réel, de fonctionnement immédiat, il ne peut pas y avoir de page blanche. Les algorithmes sont cependant suffisamment bien faits, bien agencés, pour que l'on accède à une certaine liberté.

Pensez-vous que la synthèse par modèles physiques soit suffisamment révolutionnaire pour provoquer un changement esthétique, un nouveau type d'œuvre ?

Je n'ai pas encore entendu d'œuvres qui puisse permettre d'affirmer cela. Il y a une vingtaine d'années, j'étais étudiant moi-même et j'avais écouté une conférence de Jean Claude Risset. C'était la première fois que je le voyais, et il nous avait fait écouter ces célèbres sons paradoxaux. J'étais ressorti de là en me disant « on vit une époque formidable, cette musique est incroyable, on va avoir des symphonies paradoxales, on va ressortir de la salle de concert avec la tête à l'envers, etc. », cela n'a pas eu lieu, il y a eu des œuvres, plus ou moins bonnes, mais la musique a continué sa vie... A moins que l'on invente quelque chose de fabuleux dans les années à venir, mais je ne vois pas ce que cela pourrait être, je ne pense pas qu'une technique ou même qu'une combinaison technologie/concept/outils qui fonctionne, puisse révolutionner complètement la musique. Même les modèles physiques, même une musique sans haut-parleurs branchée directement dans le cerveau, même si au bout du compte, il n'y a même plus d'instruments, s'il n'y a plus rien, au-delà de la démonstration, cela ne nous empêchera pas d'écouter les variations Goldberg. Qu'il y ait un jour une œuvre qui doive aux modèles physiques sa spécificité, son

intérêt, c'est possible, mais qu'en tant que telle, la synthèse par modèles physiques fasse que l'on ait des perspectives radicalement différentes sur la musique, je ne pense pas.

Vous connaissez les musiques minimalistes d'il y a 15-20 ans, le Sonic Art Union avec Alvin, Lucier et Gornon Mumma ? Ils étaient à mi-chemin entre la culture sonore et la performance et ils ont fait un disque, inaudible, un double album qui s'appelle « music on a long side rope ». Il s'agit une corde, une vraie, qui fait 15 à 20 mètres de long, qui est tendue et mise en vibration par un dispositif électromagnétique. En ce déplaçant dans la pièce on découvre un aspect sculptural du dispositif et des infimes et de minimales variations au niveau sonore. Virtuellement, j'aimerais bien que quelqu'un fasse quelque chose de ce genre. Il y aurait là une particularité des modèles physiques. Je n'avais pas vu cette pièce, mais j'en ai vu une autre, il y a aussi une vingtaine d'années, au centre américain. Un violoncelle, sans instrumentiste, était excité par je ne sais quel système électromagnétique qui s'approchait du violoncelle, puis reculait, etc. en même temps il y avait un système de lumière. Le violoncelle était excité visiblement avec quelque chose, bien sûr, mais avec une chose immatérielle. Si j'avais le temps et si j'étais de cette tendance là, cela m'intéresserait. Ce que j'aimerais, et peut-être que je le ferais, - là le temps réel pourrait m'aider - c'est à la fois d'utiliser le modèle physique mais également de le montrer concrètement. Le modèle, lui-même, peut être séduisant : c'est beau une corde de 45 mètres de long sur laquelle on souffle et qui fait un bruit énorme ! Cet imaginaire, si on arrivait à le rendre réel, le montrer par la musique, là Modalys serait intéressant. Mais je ne sais pas comment le réaliser.

Le modèle peut-il servir lui-même, à mettre l'œuvre en place ?

Moi, je pense que oui. Que cela prenne une forme audiovisuelle, conceptuelle ou autre, cela ne me paraît pas une mauvaise idée en soi. Le modèle physique, en ce qui concerne l'imaginaire, a plus de répondant que le signal. C'est tentant de le mettre en avant, de le valoriser. Peut-être court-on le risque de se fourvoyer... Le danger est de retourner à un simulacre d'instrument, de faire une mise en œuvre un peu lourde pour des résultats sonores qui sont certes valables, mais auxquels on aurait pu accéder par ailleurs. Le fait qu'on y accède par ces moyens là n'est pas neutre cependant, c'est ce qui est amusant, et c'est travailler l'imaginaire.

Parlez-moi des œuvres que vous avez composées et dans lesquelles vous utilisez des sons obtenus grâce à Modalys.

Je pense tout de suite à une commande de la ville de Gentilly, l'Ivresse est un Nombre¹⁵⁵, pour flûte, clarinette et dispositif électroacoustique où j'ai utilisé Modalys pour la première fois. Au début de l'œuvre, il y a bien 5-6 minutes ou tout ce qui se passe derrière la flûte et la clarinette, sur la bande, est vraiment fait avec Modalys. J'avais créé des sons et les avais placés dans un échantillonneur pour les jouer. Ce principe fonctionne bien. Là, en l'occurrence, c'était un moyen de faire du son. Il était produit par Modalys, puis travaillé de manière totalement traditionnelle dans la chaîne électroacoustique. C'est ce que beaucoup de gens font.

¹⁵⁵ voir annexe 2 § 5.1 (CD2 page 1).

Je pense également à un disque de poésie sonore que j'ai fait avec Julien Blaine où, de même, je m'étais créé des claviers de bruits, des gongs, des plaques, des rebonds, des choses dynamiques en rapport avec la voix et la poésie. Je fais ainsi de la musique avec des poètes et à cette occasion, je peux prendre des sons Modalys aussi bien que d'autres. En effet, dans mes collections de sons échantillonnés, j'ai beaucoup de sons faits avec Modalys, mais ils appartiennent de base à ma collection et je ne les remarque pas plus que cela.

Je pourrais vous citer nombre de pièces, quand j'y réfléchis, où j'ai utilisé Modalys comme un générateur, une bibliothèque de sons, et absolument pas comme je dis qu'il faudrait l'utiliser, pas du tout en valorisant le modèle, ni en jouant de l'imaginaire ! Simplement en utilisant mes sons, faits avec Modalys, mais, par contre en les retouchant. J'allais dire « en les cachant » mais ce n'est pas le mot...

Des installations qui, comme je l'ai mentionné, mettraient en scène le modèle, il est vrai que je n'ai pas l'occasion d'en faire, mais je ne dis pas que je n'en ferai pas. A ce niveau là, c'est un problème d'interface. Il faudrait trouver une interface qui soit parlante avec ce type de procédé. Ce que j'ai trouvé beau avec Modalys, c'est cet effet au niveau de l'imaginaire, sur la pesanteur, la légèreté, qu'il faudrait réussir à rendre visible... je ne sais pas encore comment.

3. Courriers de David Jaffe

Voici deux brefs courriers électroniques envoyés par David Jaffe en réponse à quelques-unes de mes questions. Ils donnent une idée claire de l'intérêt que le compositeur tire de la synthèse par modèles physiques.

<p>From: David A. Jaffe <david@jaffe.com> To: Aline Hufschmitt <alinehuf@multimania.com> Subject: Re: Some questions from a french student</p> <p>Bonjour,</p>	
<p>Thank you for your interest in my music. There is a lot of information on my web site: www.jaffe.com</p> <p><i>I'd like to know what is the interest of [physical modeling]technique for a composer. What is the favours or the disadvantages compared with the other digital sound synthesis techniques.</i></p> <p>I actually wrote a paper on this subject called « 10 Criteria for Evaluating Synthesis Techniques », published in Computer Music Journal several years ago.</p> <p>I find physical models have just the right degree of « robustness of identity » (you can change the parameters drastically, and get a wide range of sounds, but they are all related perceptually.)</p> <p>I use this technique to abstract from the « known » towards the « unknown ». That is, I think of a real instrument, then think of what would be difficult or impossible for it to do (either in an ensemble sense, or an acoustic sense), and then use that as a starting point for my compositions.</p> <p>I also have a philosophy of « hybridization » which is described in a paper I wrote for Leonardo Music Journal¹⁵⁶. You can find that paper on my web site.</p> <p>I hope this info helps.</p>	<p>Merci de vous intéresser à ma musique. Il y a de nombreuses informations sur mon site web : www.jaffe.com</p> <p><i>J'aimerais savoir quel est l'intérêt de la synthèse par modèles physiques pour un compositeur. Quels sont les avantages et les inconvénients par rapport aux autres techniques de synthèse digitale ?</i></p> <p>J'ai actuellement écrit un document sur ce sujet, intitulé « dix critères pour évaluer les techniques de synthèse », publié dans le <i>Computer Music Journal</i> il y a quelques années.</p> <p>Je trouve que les modèles physiques ont juste le bon degré de « robustesse » d'identité (vous pouvez changer les paramètres de manière drastique et obtenir une grande variété de sons qui sont tous proches perceptiblement).</p> <p>J'utilise cette technique pour progresser dans l'abstraction du « connu » vers « l'inconnu ». De là, je pense à un instrument réel, puis à ce qui lui serait difficile, voire impossible de faire (autant au niveau de l'exécution qu'au niveau acoustique), alors j'utilise ceci comme point de départ pour mes compositions.</p> <p>J'ai également une philosophie de « l'hybridation » qui est décrite dans un article que j'ai écrit pour le <i>Leonardo Music Journal</i>. Vous pouvez trouver cet article sur mon site web.</p> <p>J'espère que ces informations vous aideront.</p>
<p>David Jaffe</p>	

¹⁵⁶ Le document en question est « Orchestrating the chimera : Musical hybrids, technology and the development of a 'maximalist' musical style », disponible sur www.jaffe.com.

Date: Sat, 15 Apr 2000 21:10:24 -0700
 From: David A. Jaffe <david@jaffe.com>
 To: Aline Hufschmitt <alinehuf@multimania.com>
 Subject: Re: Aline Hufschmitt

Hello,

I will try to answer your questions as best I can...

My emphasis on plucked strings stems from several factors:

1. I am a mandolinist and so have an interest in plucked strings.
2. In 1980, I was commissioned to write a work for 8 guitars, voice and tape and was trying to find electronic sounds that would complement the guitar and voice sounds, so I became interested in plucked string synthesis. During this time, I was lucky enough to meet Alex Strong, who had just discovered a technique similar to a physical model of the guitar. At this time, physical models were very computationally expensive and really not practical. But Alex's model was practical and could run in real time on the Samson Box (the synthesizer at Stanford University.)
3. I feel that plucked string sounds are under-utilized in classical music, so it seemed like an area that had a lot of room for exploration.
4. I spent a great deal of time doing research on generating effective plucked string sounds. I haven't spent the time on other sounds, so I was inclined to use plucked string sounds. I did try to use some bowed-string-like sounds in Grass, but they don't quite sound like bowed strings, though I think they are effective in the piece.

Have you heard of the work at Ircam or ACROE ? The models of modal synthesis are proposed to the musicians in the softwares Modalys and Cordis Anima. Is the waveguide synthesis integrated to a « commercial » software ?

I am familiar with the work at both IRCAM and ACROE. Both are doing excellent work. The waveguide techniques were first « commercially » implemented in the NeXT Music Kit, but this was for the NeXT computer, which is no longer being made. The Music Kit still exists, but it requires special hardware.

The software I used for my own pieces was all custom ('experimental') software.

...Suite p. 169.

Date: Sat, 15 Apr 2000 21:10:24 -0700
 From: David A. Jaffe <david@jaffe.com>
 To: Aline Hufschmitt <alinehuf@multimania.com>
 Subject: Re: Aline Hufschmitt

Bonjour,

Je vais essayer de répondre à vos questions du mieux que je peux.

Mon intérêt pour les cordes pincées tient à différents facteurs :

1. Je suis mandoliniste et j'ai donc un intérêt pour les cordes pincées.
2. En 1980, j'ai reçu la commande d'une œuvre pour huit guitares, voix et bande et j'ai essayé de trouver des sons électroniques qui puissent constituer le complément de la guitare et de la voix ; j'ai donc été intéressé par la synthèse des cordes pincées. A ce moment, j'ai eu assez de chance pour rencontrer Alex Strong qui venait de découvrir une technique semblable à un modèle physique de guitare. A cette période les modèles physiques étaient très coûteux en temps de calcul et vraiment impraticables. Cependant, le modèle d'Alex était praticable et pouvait fonctionner en temps réel sur le *Sanson Box* (le synthétiseur de l'université de Stanford).
3. Je sens que les sons de cordes pincées sont sous-employés dans la musique classique et ce domaine semble bien pouvoir faire l'objet de nombreux champs d'exploitation.
4. J'ai passé énormément de temps à faire des recherches pour générer des sons de cordes pincées satisfaisants. J'ai essayé d'utiliser quelques sons de cordes frottées dans *Grass*, mais ils ne sonnent pas vraiment comme des cordes frottées, bien que je pense qu'ils soient convaincants dans cette pièce.

Etes-vous au courant des travaux réalisés à l'Ircam et à l'ACROE ? Les outils de synthèse modale sont mis à la disposition des musiciens sous la forme de Modalys et Cordi-Anima, La synthèse par guides d'ondes est elle aussi intégrée à un logiciel « commercial » ?

Je suis familier avec les travaux réalisés à l'Ircam et à l'ACROE, les deux font un excellent travail. La technique des guides d'ondes a été au départ « commercialement » implantée dans le « NeXT music kit », mais ceci était réservé aux ordinateurs NeXT qui ont cessé d'être produits. Le kit continue d'exister mais il nécessite un équipement spécial. Les logiciels que j'utilise pour mes propres pièces sont tous des programmes expérimentaux.

...Suite p. 170.

I have read some papers about gestual control of the waveguide synthesis. Do you used this sort of real time interfaces ? or are you programming step by step the parameters and enveloppes to control your models ?

I have done this, but only sometimes. It was more difficult in those days. I have often found that I can write algorithms that impart a sense of expression. I also « hand-adjust » a lot.

The commercial synthetisers using physical model synthesis are all using sorts of waveguide synthesis... do you know why ? What qualities of this technique are the reasons of this choice ? What are you thinking about these commercial applications ?

I am impressed with the Yamaha VL-1 and related synthesizers. It is not very flexible in terms of topology, but it is quite effective for wind instruments in particular. As to why they use this form of physical modeling, it is largely because of efficiency.

You are using electroacoustic parts on tape... But I have heard that waveguide synthesis is pretty well real time working. So, why don't you use it on real time in concert ? Why don't you prepare your models and made them compute the sound in real time ?

All of these pieces were done during a time when real time was not possible. Or, rather, not portable (we could do real time at stanford, but it was not portable.)

However, also, the sounds in these pieces were designed in a hand-crafted way that would have been difficult to « perform » in real-time (other than just having the computer generate the sound in real time from a fixed score.)

Have you ever used the modal physical model synthesis (like Modalys or Cordis Anima) ? If so, could you make a critical comparison ?

I have used modal synthesis a bit, but not either of these packages. I found modal synthesis particularly effective for percussion, and for « cross-synthesis ». But I don't really have enough experience with it to critically compare it to waveguide synthesis. As a composer, I am most interested in music.

The technique is a means to a musical end.

A bientôt,

David

J'ai lu quelques articles à propos du contrôle gestuel de la synthèse par guides d'ondes. Utilisez-vous ce genre d'interfaces en temps réel, ou programmez-vous pas à pas les paramètres et les enveloppes pour contrôler vos modèles?

J'ai fait cela mais seulement quelques fois. C'était plus difficile à ces moments-là. J'ai souvent trouvé que je pouvais écrire des algorithmes qui contenaient une forme d'expressivité. J'ajuste beaucoup à la main, également.

Les synthétiseurs commerciaux utilisant les modèles physiques utilisent tous des formes de synthèse par guides d'ondes... savez-vous pourquoi ? Quelles qualités de cette technique sont la raison de ce choix ? Que pensez-vous de ces applications commerciales ?

Je suis impressionné par le VL1 et les synthétiseurs apparentés. Ils ne sont pas très flexibles en termes de topologie, mais ils sont très efficaces pour les instruments à vent en particulier. Quant à savoir pourquoi ils utilisent cette forme de synthèse physique, c'est largement dû à son efficacité.

Vous réalisez vos parties électroacoustiques sur bande. Cependant, j'ai appris que la synthèse par guides d'ondes fonctionnait parfaitement bien en temps réel. Alors, pourquoi n'avez-vous pas utilisé le temps réel en concert ? Pourquoi ne préparez-vous pas vos modèles à l'avance et ne les faites vous pas calculer les sons en temps réel ?

Toutes ces pièces ont été exécutées à une période à laquelle le temps réel n'était pas possible ou bien intransportable. De toute façon, les sons, dans cette pièce, ont été conçus de manière artisanale. Il aurait été difficile de l'exécuter en temps réel (ou bien, de laisser l'ordinateur générer le son en temps réel à partir d'une partition fixée).

Avez-vous déjà utilisé la synthèse modale (comme Modalys ou Cordis-Anima) ? Si oui pourriez-vous faire une comparaison critique ?

j'ai utilisé un peu la synthèse modale, mais jamais avec ces deux logiciels. J'ai trouvé la synthèse modale particulièrement efficace pour les percussions et pour la synthèse croisée. Mais je n'ai pas suffisamment d'expérience pour la comparer de façon critique aux guides d'ondes. En tant que compositeur, je suis plus intéressé par la musique. La technique n'est qu'un moyen justifié par des fins musicales.

A bientôt,

David

ANNEXE 2 : EXEMPLES MUSICAUX

CD1

- CD1 Plage 1. *Pipe and Drum* : œuvre intégrale, disponible chez Wergo.
- CD1 Plage 2. Instrument Hybride : Hybridation d'une corde de piano et d'une membrane.
- CD1 Plage 3. Tube acoustique : Trompette modale.
- CD1 Plage 4. Tube hybride : Anche + Tube + Trou.
- CD1 Plage 5. Plaque vibrante : Grande plaque.
- CD1 Plage 6. Plaque vibrante : Carillon.
- CD1 Plage 7. Plaque hybride : changement de structure de la plaque en cours de jeu.
- CD1 Plage 8. Instruments de type Xylophone.
- CD1 Plage 9. Membrane excitée avec un balai.
- CD1 Plage 10. Membrane changeant de matériau.
- CD1 Plage 11. Corde frottée : frottement de deux cordes en acier.
- CD1 Plage 12. Corde frottée : frottement d'une corde à l'archet.
- CD1 Plage 13. Corde pincée : guitare stéréo.
- CD1 Plage 14. Corde hybride en glace et en bois excitée par un contrôleur de type flûte.
- CD1 Plage 15. Cloche.
- CD1 Plage 16. Phénomène de rebond : masse lâchée au dessus d'une plaque.
- CD1 Plage 17. Entrechoquement de structures.
- CD1 Plage 18. Cloche frappée à plusieurs endroits, avec plusieurs forces différentes.
- CD1 Plage 19. Rebonds très serrés sur une plaque.
- CD1 Plage 20. Petit rebond métallique.
- CD1 Plage 21. Corde pincée dont la tension varie pendant le jeu.
- CD1 Plage 22. Entrechoquements de plaques et excitation d'une anche à la fin.
- CD1 Plage 23. Entrechoquement de cordes.
- CD1 Plage 24. Cordes pincées.
- CD1 Plage 25. Anche simple, modèle de base.
- CD1 Plage 26. *Amers*, œuvre intégrale, concert non publié
- CD1 Plage 27. *Dans la distance* : œuvre intégrale, non publiée.
- CD1 Plage 28. *Dans la distance* : partie électroacoustique seule.

CD2

- CD2 plage 1.** *L'Ivresse est un nombre* : 5 premières minutes de l'œuvre, non publiée.
- CD2 plage 2.** *Fleurs et Insectes* : œuvre intégrale.
- CD2 plage 3.** Contrebasse jouée à l'archet.
- CD2 plage 4.** Son de cornemuse.
- CD2 plage 5.** Courte mélodie avec un son de basson et quelques notes staccato.
- CD2 plage 6.** Son de clarinette. Jeu sur l'articulation legato ou staccato.
- CD2 plage 7.** Son obtenu par excitation d'une plaque par le contrôleur de souffle.
- CD2 plage 8.** Son de Didgeridoo avec jeu d'articulation.
- CD2 plage 9.** Imitation d'un son de synthétiseur Akai « EWI ».
- CD2 plage 10.** Son de Cor avec réverbération simulant une grande salle.
- CD2 plage 11.** Son de fifre.
- CD2 plage 12.** Mélange de trois voix de guitare avec une basse.
- CD2 plage 13.** Entrechoquement chaotique de plaque de métal.
- CD2 plage 14.** Imitation d'une flûte traversière en Ut.
- CD2 plage 15.** Son de flûte avec distorsions métalliques du son.
- CD2 plage 16.** Son d'anche simple, très violent, avec des phénomènes de distorsion.
- CD2 plage 17.** Imitation d'un instrument à anche double de l'Est de la Chine.
- CD2 plage 18.** Son de Cithare associé à un effet de guitare électrique.
- CD2 plage 19.** Son de tuba.
- CD2 plage 20.** Bruitage humoristique imitant le cri d'un Yack.
- CD2 plage 21.** Introduction : présentation du VG8.
- CD2 plage 22.** Présentation d'une simulation de guitare à douze cordes.
- CD2 plage 23.** Présentation du son « AC-Duet ».
- CD2 plage 24.** Son de guitare acoustique amplifiée.
- CD2 plage 25.** Présentation du son « archtop ».
- CD2 plage 26.** Son de banjo.
- CD2 plage 27.** Son de guitare « acces bohl ».
- CD2 plage 28.** Son de guitare « métal ».
- CD2 plage 29.** Son de guitare « vintage ».
- CD2 plage 30.** Tentative d'imitation d'un son d'orgue avec le VG8.
- CD2 plage 31.** *May all your children be acrobats* : œuvre intégrale, non publiée.
- CD2 plage 32.** *Telegram to the president* : œuvre intégrale.
- CD2 plage 33.** *Silicon Valley Breakdown* : œuvre intégrale.
- CD2 plage 34.** *Grass* : œuvre intégrale, non publiée.

1. *Pipe and Drum* de Ercolono Ferreti, 1963

CD1 Plage 1. *Pipe and Drum* : œuvre intégrale, disponible chez Wergo¹⁵⁷.

Pipe and Drum est une œuvre remarquable du fait qu'elle utilise pour la première fois la synthèse par modèles physiques. Elle date de 1963, c'est à dire des toutes premières années de recherche sur la synthèse physique. Entièrement synthétisée par ordinateur, elle a été réalisée aux laboratoires Bell. Le résultat sonore est déjà remarquable pour l'époque; L'étonnante musicalité de cette pièce démontre l'intérêt du compositeur pour une imitation minutieuse du geste instrumental humain. L'auteur décrit ainsi la façon dont les sons instrumentaux ont été créés :

« The waveforms consist of a sum of components where each component contains independent frequency and amplitude characteristics. All of the parameters of music such as tempo, meter, pitch, amplitude, frequency, tone quality, melody, harmony, and performance characteristics are specified as sets of data. Once the sets of data have been decided upon, only the algorithms change from run to run, i.e., practicing. The objective was to minimize the input information in anticipation of the availability of real-time interactive computer music system, projected for sometime in the future.¹⁵⁸ »

Cette œuvre, comme l'indique l'auteur, est une expérimentation ayant pour but de préserver le caractère vivant de la musique traditionnelle en utilisant pourtant l'ordinateur comme base pour la création musicale.

¹⁵⁷ E. Ferreti, « Pipe and drums », *Historical CD of digital sound synthesis*, Computer music currents 13, Digital music digital, Wergo.

¹⁵⁸ Note du livret du disque cité précédemment.

Je traduis : « Les formes d'ondes consistent en une somme de composantes qui comportent chacune des caractéristiques de fréquence et d'amplitude indépendantes. Tous les paramètres musicaux comme le tempo, la métrique, la hauteur, l'amplitude, la fréquence, la qualité sonore, la mélodie, l'harmonie et les caractéristiques de l'exécution sont spécifiés sous forme de listes de données. Une fois que les listes de données sont établies, seuls les algorithmes changent pas à pas, c'est à dire, calculent. L'objectif était de minimiser l'entrée d'information en anticipant la capacité du système musical informatique interactif à fonctionner en temps réel, prévue dans le futur. »

2. Sons réalisés avec Modalys

Voici divers sons provenant du site Internet de l'IRCAM (<http://www.Ircam.fr>) et donnant une idée de ce que l'on peut obtenir grâce au logiciel Modalys :

- CD1 Plage 2.** Instrument Hybride : Hybridation d'une corde de piano et d'une membrane.
- CD1 Plage 3.** Tube acoustique : Trompette modale.
- CD1 Plage 4.** Tube hybride : Anche + Tube + Trou.
- CD1 Plage 5.** Plaque vibrante : Grande plaque.
- CD1 Plage 6.** Plaque vibrante : Carillon.
- CD1 Plage 7.** Plaque hybride : changement de structure de la plaque en cours de jeu.
- CD1 Plage 8.** Instruments de type Xylophone.
- CD1 Plage 9.** Membrane excitée avec un balai.
- CD1 Plage 10.** Membrane changeant de matériau.
- CD1 Plage 11.** Corde frottée : frottement de deux cordes en acier.
- CD1 Plage 12.** Corde frottée : frottement d'une corde à l'archet.
- CD1 Plage 13.** Corde pincée : guitare stéréo.
- CD1 Plage 14.** Corde hybride en glace et en bois excitée par un contrôleur de type flûte.

Les sons suivants ont été réalisés par Guillaume Loizillon et apparaissent dans les œuvres *L'Ivresse est un nombre* et *Fleurs et insectes* :

- CD1 Plage 15.** Cloche.
- CD1 Plage 16.** Phénomène de rebond : masse lâchée au dessus d'une plaque.
- CD1 Plage 17.** Entrechoquement de structures.
- CD1 Plage 18.** Cloche frappée à plusieurs endroits, avec plusieurs forces différentes.
- CD1 Plage 19.** Rebonds très serrés sur une plaque.
- CD1 Plage 20.** Petit rebond métallique.
- CD1 Plage 21.** Corde pincée dont la tension varie pendant le jeu.
- CD1 Plage 22.** Entrechoquements de plaques et excitation d'une anche à la fin.
- CD1 Plage 23.** Entrechoquement de cordes.
- CD1 Plage 24.** Cordes pincées.
- CD1 Plage 25.** Anche simple, modèle de base.

3. **Amers de Kaija Saariaho, 1992**

CD1 Plage 26. *Amers*, œuvre intégrale, concert non publié du 11 décembre 1992 au Centre George Pompidou.

Amers est le titre d'un recueil de Saint John Perse évoquant ces points de repère jalonnant la côte pour les navigateurs. « L'une des premières idées à l'origine d'*Amers* était en effet la vision d'un violoncelle soliste "comme un marin navigant dans la mer des sons", dont la traversée, balisée de passages obligés par certains états de la matière sonore, serait empêchée par la nature qui l'entoure¹⁵⁹ ». *Amers* est une œuvre pour orchestre et violoncelle soliste, dédiée au violoncelliste Anssi Karttunen. La partie électroacoustique est constituée d'une part de la transformation en direct des sons du violoncelle, et d'autre part de sons préenregistrés et joués grâce à un échantillonneur.

La synthèse sonore, dans *Amers*, est réalisée avec des modèles de résonance conçus à partir du trille initial du violoncelle et complétés par des modèles, inspirés des cloches et des percussions, réalisées grâce à Mosaïc. Les sons obtenus par modèles de résonance sont également mixés avec le programme Mosaïc, doté d'attaques plus précises. Les sons percussifs obtenus avec l'aide de Mosaïc sont regroupés en six programmes joués par l'échantillonneur : Plattenglocken, Ppagliss, Glockenchro, Marimba, Glockenkwi et Woodykwi. Ses sonorités très réalistes se fondent totalement dans l'ensemble orchestral.

¹⁵⁹ K. Saariaho, « Notes du programme de la création » dans *Amers, cahier d'exploitation*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, 1992, p. 31-32.

4. Dans la distance de François Nicolas, 1994

CD1 Plage 27. *Dans la distance* : œuvre intégrale, non publiée.

Commandée par l'Ircam, cette œuvre pour orchestre et électroacoustique a été jouée pour la première fois au Centre Georges-Pompidou à Paris, le 25 février 1994. La partie électroacoustique utilise une technique de construction granulaire. Certains grains ont été synthétisés grâce à Mosaïc, mais il est dur de les distinguer tant la technique granulaire les transforme. Par contre, certains sons plus longs sont reconnaissables : un timbre de clavecin et des sons de cordes pincées.

CD1 Plage 28. *Dans la distance* : partie électroacoustique seule.

Afin de permettre une meilleure perception du détail de cette partie, un enregistrement de la partie électroacoustique seule est également disponible sur le disque d'exemples sonores. Cette plage présente également les séquences de texte enregistrées et travaillées.

5. Guillaume Loizillon

5.1. *L'Ivresse est un nombre*

CD2 plage 1. *L'Ivresse est un nombre* : cinq premières minutes de l'œuvre, non publiée.

Commande de la ville de Gentilly, *L'Ivresse est un Nombre*, est une œuvre pour flûte, clarinette et dispositif électroacoustique où Guillaume Loizillon a utilisé Modalys pour la première fois. Au début de l'œuvre, pendant 5-6 minutes tout ce qui se passe sur la bande derrière la flûte et la clarinette, est réalisé avec Modalys.

Les sons créés sont travaillé de manière totalement traditionnelle dans la chaîne électroacoustique puis joués grâce à un échantillonneur.

Cette pièce n'est pas éditée, et l'extrait choisi par l'auteur est constitué des cinq premières minutes de l'œuvre. Celui-ci utilise principalement, dans cette partie, des sons typiques de Modalys, de plaques s'entrechoquant ou excitées par une masse qui rebondit sur leur surface (voir Annexe 2 § 2, Sons réalisés avec Modalys par Guillaume Loizillon).

5.2. *Fleurs et Insectes*

CD2 plage 2. *Fleurs et Insectes* : œuvre intégrale disponible chez Trace¹⁶⁰.

Cette œuvre que l'auteur qualifie de poésie sonore, ou poésie mise en musique, est réalisée sur un texte de Julien Blaine. Dans cette pièce l'auteur utilise « des claviers de bruits, des gongs, des plaques, des rebonds, des choses dynamiques en rapport avec la voix et la poésie¹⁶¹ ». A 1'45" du début de la plage, on peut entendre nettement un effet de transformation de la voix, réalisé avec Modalys : la voix est utilisée, sous forme de fichier son, comme source d'excitation d'une plaque, celle-ci se retrouve alors chargée de résonances métalliques.

¹⁶⁰ G. Loizillon, « Fleurs et insectes », *Vanités*, Trace 004, 1997.

¹⁶¹ Voir annexe 1 § 2. Entretien avec Guillaume Loizillon.

6. Sons provenant du synthétiseur VL1 de Yamaha

Les exemples sonores suivants sont extraits du site de l'internaute Ken Barry à l'adresse : <http://www.sky.net/~kennyb/vl1m/audio/index.html>. Ces sons ont été exécutés à partir du synthétiseur Yamaha VL1-m utilisé avec le contrôleur MIDI de souffle WX7, même pour les instruments ne coïncidant pas avec ce type de contrôleur. Ces exemples permettent de se faire une idée assez juste des capacités et défauts de ce synthétiseur :

- CD2 plage 3.** Contrebasse jouée à l'archet.
- CD2 plage 4.** Son de cornemuse. La clef « hold » du contrôleur de souffle WX permet de tenir le bourdon.
- CD2 plage 5.** Courte mélodie avec un son de basson et quelques notes staccato.
- CD2 plage 6.** Son de clarinette. Jeu sur l'articulation legato ou staccato.
- CD2 plage 7.** Son étrange obtenu par excitation d'une plaque par le contrôleur de souffle.
- CD2 plage 8.** Son de didgeridoo avec jeu d'articulation dans l'embouchure du contrôleur.
- CD2 plage 9.** Imitation d'un son de synthétiseur Akai « EWI ».
- CD2 plage 10.** Son de cor avec réverbération simulant une grande salle.
- CD2 plage 11.** Son de fifre.
- CD2 plage 12.** Mélange de trois voix de guitare avec une basse, le tout joué par une seule personne, toujours avec le contrôleur de souffle.
- CD2 plage 13.** Entrechoquement chaotique de plaques de métal.
- CD2 plage 14.** Imitation d'une flûte traversière en *Ut*.
- CD2 plage 15.** Son de flûte. L'algorithme est modifié pour provoquer des distorsions métalliques du son. L'instrumentiste utilise un contrôleur avec anche simple.
- CD2 plage 16.** Son d'anche simple, très violent, avec de nombreux phénomènes de distorsion.
- CD2 plage 17.** Imitation d'un instrument à anche double de l'Est de la Chine.
- CD2 plage 18.** Son de cithare associé à un effet de guitare électrique.
- CD2 plage 19.** Son de tuba.
- CD2 plage 20.** Bruitage humoristique imitant le cri d'un Yack réalisé avec un modèle d'anche simple.

7. Sons du synthétiseur VG8 de Roland

Les exemples sonores proposés ci-dessous sont les bandes son de très courts films publicitaires proposés par Roland pour donner à la clientèle une idée des sonorités réalisables avec le VG8. Les films peuvent être visionnés depuis la page : http://www.rolandus.com/PRODUCTS/MI/MI_GP.HTM. Cette démonstration du VG est réalisée par Jeff Baxter. Ces exemples sonores nous permettront de nous faire une idée des possibilités de cette machine :

CD2 plage 21. Introduction : présentation du VG8 par Jeff Baxter.

CD2 plage 22. Présentation d'une simulation de guitare à douze cordes.

CD2 plage 23. Présentation du son « AC-Duet ».

CD2 plage 24. Son de guitare acoustique amplifiée.

CD2 plage 25. Présentation du son « Archtop ».

CD2 plage 26. Son de banjo.

CD2 plage 27. Son de guitare « Axis Bold ».

CD2 plage 28. Son de guitare « métal ».

CD2 plage 29. Son de guitare « Vintage Tube ».

CD2 plage 30. Tentative d'imitation d'un son d'orgue avec le VG8.

8. David Jaffe

8.1. May your children be acrobats (1981)

CD2 plage 31. *May all your children be acrobats* : œuvre intégrale, non publiée.

Cette œuvre pour huit guitares, soprano et bande générée par ordinateur, est une célébration de la sagesse populaire aussi bien que de la sottise. Elle a été commandée et jouée pour la première fois, en 1980, par David Starobin et le « Purchase Guitar Ensemble ». Le texte est extrait de *The people, Yes* de Carl Sandburg (voir Figure 55, p. 182-183) et consiste en un ensemble de proverbes, paroles et anecdotes provenant d'immigrants, autochtones, idiots, et autres Américains, riches ou d'autres milieux. Accompagnant ce texte, la musique est hétérogène et s'étend du bluegrass, des styles irlandais, juifs ou afro-américains, jusqu'au style populaire américain voire au style classique européen.

La partie informatique a été créée au CCRMA de Stanford et utilise une synthèse sonore basée sur la technique des guides d'ondes. Les sons de cordes pincées obtenus sont reconnaissables par leur aspect parfois très métallique, mais ils sont à d'autres instants très proches des sonorités douces des guitares.

May All Your Chudren Be Acrobats

for mezzo-soprano, eight guitars and computer-generated tape

text from « The People, YES » by Carl Sandburg

(from *the complete poems of Carl Sandburg*, copyright 1950 by Carl Sandburg and renewed 1978
by Margaret Sandburg, Helga Sandburg Crile, and Janet Sandburg, used by permission of Harcourt Brace
Jovanovich, Inc.)

excerpted and assembled by David A. Jaffe

I.

The People, YES!

They have their proverbs, old and new.

II.

We'll see what we'll see.

Time is a great teacher.

Today me and tomorrow maybe you.

Even if your stomach be strong, eat as few cockroaches as possible.

III.

What is bred in the bone will tell.

Between the inbreeds and the crossbreeds the argument goes on.

You can breed them up as easy as you can them down.

« I don't know who my ancestors were, » said a mongrel, « but we've been descending for a long time. »

« My ancestors », said the Cherokee-blooded Oklahoman,

« didn't come over on the Mayflower but we were there to meet the boat! »

« Why, » said the Denver Irish policeman as he arrested a Pawnee Indian I.W.W. soap-boxer, « why don't you go back to where you came from?! »

IV.

Wedlock is padlock.

We all belong to one big family and have the same smell.

A wife is not a guitar you hang on the wall after playing it.

Take a good look at the mother before getting tied up with the daughter.

Let a mother be ever so bad she wishes her daughter to be good.

The man hardly ever marries the woman he jokes about:

she often marries the man she laughs at.

Keep your eyes open before marriage, half-shut afterwards.

V.

Blue eyes say love me or I'll die.

Black eyes say love me or I'll kill you.

Wash a dog, comb a dog, still a dog.

VI.

You don't know enough to come in when it rains.

You don't know beans when the bag is open.

You don't know enough to pound sound into a rat hole.

*The white man drew a small circle in the sand and told the red man, « This is what the Indian knows, »
and drawing a big circle around the*

*small one, « This is what the white man knows. » The Indian took the stick and swept an immense ring
around both circles: « This is where the white man and the red man know nothing. »*

*All I know is what I hear.
 All I know is what I read in the papers.
 All I know you can put in a thimble.
 All I know I keep forgetting.*

VII.

*We have to eat don't we?
 You can't eat promises can you?
 You can't eat the Constitution can you?*

I can eat crow but I don 't hanker after it

VIII.

*Out of the roots of the earth,
 Out of dirt, barns, workshops, timetables,
 Out of lumberjack payday jamborees,
 Out of joybells and headaches the day after,
 Out of births, weddings, accidents,
 Out of wars, laws, promises, betrayals,
 Out of mists of the lost and anonymous,
 Out of plain living, early rising and spare belongings:*

YES!

They...

*An expert is only a damn fool a long way from home.
 You're either a thoroughbred, a scrub, or an in-between.
 Speed is boni with the foal-sometimes.*

They have...

*Always some dark horse never heard of before is coming under the wire a winner.
 A thoroughbred always wins against a scrub, though you never know for sure : even thoroughbreds
 have their off days : new blood tells : the worn out thoroughbreds lose to the fast young scrubs.*

They have their...

*The big fish eat te little fish, the little fish eat shrimps and the shrimps eat mud.
 proverbs, old and new!*

IX.

*The best preacher is the heart.
 The best teacher is time.
 The best book is the world.
 The best friend is... [God].*

Figure 55 : Texte de *May all your children be acrobats.*

8.2. Telegram to the president (1984)

CD2 plage 32. *Telegram to the president* : œuvre intégrale disponible chez Centaur Label¹⁶².

Telegram to the president est une œuvre épigrammatique commandée par le Kronos Quartet et possède la forme d'un prélude et fugue avec coda. Dans le prélude, l'ordinateur est mis en avant à la manière d'un soliste imaginaire, alors que dans la fugue l'attention est fixée sur le quartet. David Jaffe remarque que ce n'est pas la première fois qu'il fait allusion dans ses œuvres à ses opinions politiques et sociales :

« Time and time again, I have found myself drawn to musical reflection on political and social issues. Telegram was written in bitter disappointment in the 1984 re-election of Ronald Reagan by a complacent American public. Yet in contrast to this tone of indictment, the content of the telegram is a message of hope, a gentle faith in the continuing vitality of the grass roots American spirit.¹⁶³ »

Le texte du télégramme est tiré d'un poème de Langston Hughes datant de 1933 :

...*Oh, let America be America again
The land that never was
And yet must be
The land where every man is free.
...Oh yes! I say it plain.
America never was America to me
And yet I swear this oath
America will be!*

La partie synthétique jouée par l'ordinateur est basée sur une synthèse de corde pincée développée par l'auteur en collaboration avec Julius Smith, Kevin Karplus et Alex Strong. Cette technique a été réalisée au CCRMA de l'université de Stanford grâce au Systems Concepts Digital Synthesizer. Les cordes pincées électroniques font preuve d'une virtuosité inégalable par les instruments réels. Les pincements se fondent par moments en séries d'impulsions très serrées qui forment une sorte de frottement granulaire, pendant de la sonorité du quatuor.

¹⁶² D. Jaffe, *Telegram to the president*, The Jefferson string quartet, CDMC Computer music séries vol. 8, Centaur Label, CRC 2091.

¹⁶³ Note de L'auteur accompagnant l'enregistrement non publié qu'il m'a transmit.

Je traduis : « Maintes et maintes fois, je me suis trouvé porté vers une réflexion musicale sur des sujets politiques et sociaux. *Telegram* a été écrit dans un moment d'amère déception lors de la réélection de Ronald Reagan en 1984 par un public américain complaisant. Cependant, contractant avec ce ton accusateur, le contenu du télégramme est un message d'espoir, une douce confiance dans la constante vitalité des bases de l'esprit américain. »

8.3. *Silicon Valley Breakdown* (1982)

CD2 plage 33. *Silicon Valley Breakdown* : œuvre intégrale, disponible chez Well Tempered production¹⁶⁴.

Silicon Valley Breakdown, composé en 1982 et révisé en 1993, présente une symphonie d'instruments imaginaires entièrement synthétisée par ordinateur. Cet orchestre électronique est souvent divisé en quatre ensembles plus petits, possédant chacun leur propre caractère et qualité sonore. L'enregistrement proposé est une version stéréo de l'œuvre quadripophonique originale. La pièce débute sur une musique « bluegrass » en opposition avec un matériel chromatique et abstrait. Progressivement, les deux styles échangent leurs attributs, le rythme solide du bluegrass se fracture alors que le matériel abstrait adopte l'harmonie de cette musique country. Les deux matériaux finissent par fusionner en un ensemble cohérent durant le final pour repartir finalement dans des directions opposées.

L'œuvre réalise une démonstration surprenante des possibilités de l'algorithme de Karplus / Strong. De nombreux types d'instruments sont reconnaissables : guitares de toutes les tailles, toutes les formes et associées à n'importe quelle amplification, banjos, basses électriques, mandolines et même un ukulele. Tous les types d'effets et nuances sont exécutés : glissando, trilles, liaisons, différents types de pizzicati ou pincements avec changement de pression, position ou rigidité, variations de tension des cordes ou de position des frettes, degré de vibration par sympathie des autres cordes, etc.

Le titre se réfère à un classique du style bluegrass, « Shenandoah Valley Breakdown » et illustre l'explosion rythmique complexe qui caractérise l'œuvre. L'ordinateur contrôle le rythme et l'exécution musicale d'une manière irréalisable par des instrumentistes humains. La simulation étend les possibilités traditionnelles d'imitations contrapuntiques en permettant de produire des canons « élastiques », dans lesquels les voix démarrent ensemble, divergent en tempo et se retrouvent éventuellement parfaitement synchronisées. La synthèse a été réalisée par la technique des guides d'ondes au CCRMA de Stanford, grâce au Systems Concept Digital Synthesizer. La technique utilise une grande variété de filtres et de méthodes de modulations pour brouiller les limites entre la résonance des cordes et la réverbération, entre l'instrument et l'espace. L'œuvre a été présentée pour la première fois à la Biennale de Venise et a été exécutée dans vingt autres pays.

¹⁶⁴ D. Jaffe, « Silicon Valley Breakdown », *XXIst century mandolin*, Well Tempered production, 1994.

8.4. Grass (1988)

CD2 page 34. *Grass* : œuvre intégrale, non publiée.

Grass, pour trois voix de femmes et bande, est construite sur le thème de la guérison et plus précisément, sur le thème de la cicatrisation des souffrances et blessures de guerre. Cette œuvre a été commandée, grâce à un don de Lincoln et Gloria Ladd, à l'intention du chœur du Collège Skidmore. La pièce est basée sur le poème *Grass* de Carl Sandburg :

*Pile the bodies high at Austerlitz and Waterloo.
Shovel them under and let me work
-I am the grass; I cover all.*

*And pile them high at Gettysburg
And pile them high at Ypres and Verdun.
Shovel them under and let me work.
Two years, ten years, and passengers ask the conductor :*

*What place is this ?
Where are we now ?*

*I am the grass.
Let me work.*

La partie enregistrée sur la bande est totalement synthétique et utilise une technique de synthèse des cordes développée par l'auteur, en collaboration avec Julius Smith, Kevin Karplus et Alex Strong. Les sons de cordes pincées, brefs, oscillent entre un aspect habituel et une sonorité plus métallique et percussive, entre ces deux extrêmes, de nombreux états intermédiaires interviennent au cours de l'œuvre. Quelques sons de cordes frottées sont reconnaissables bien que leur aspect soit étrange. La partie électroacoustique utilise également un réseau de réverbération en guides d'ondes variant en temps réel, système créé par Julius Smith. La pièce a été exécutée sur le Systems Concepts Digital Synthesizer au CCRMA de l'université de Stanford en 1987.

L'enregistrement de l'œuvre proposé à été réalisé pendant un concert dans des conditions non-professionnelles, le lecteur excusera donc sa qualité moyenne.

BIBLIOGRAPHIE COMMENTEE

ADRIEN, Jean-Marie, « The missing Link : Modal synthesis » dans G. De Poli, A. Picciali, and C. Roads, *Representation of the musical signal*, Cambridge, Massachussets, MIT press, 1991, p. 287.

Description générale de la synthèse modale. Paragraphe intéressant sur la simulation de la radiation sonore des instruments.

ADRIEN, Jean-Marie, *Etude de structures complexes vibrantes, application à la synthèse par modèles physiques*, mémoire de thèse de doctorat sous la direction de Raymond Siestrunck, Université de Paris VI, Paris, 1989.

Etude d'algorithmes de synthèse physique Présentation d'un modèle de corde caractérisé par une somme d'ondes progressives et généralisation à toutes les structures vibrantes caractérisées par leurs propriétés modales.

ADRIEN, Jean-Marie et Joseph MORRISON, « Control Mecanisms in the MOSAIC Synthesis Program » dans *Proceedings of the International Computer Music Conference*, San Francisco, International Computer Music Association, 1991, p. 19-22.

Description simple et claire des commandes en Scheme permettant de décrire le modèle sous Mosaïc. De courts programmes apportent des exemples concrets.

ADRIEN, Jean-Marie et Joseph MORRISON, « MOSAIC : A modular program for synthesis by modal superposition » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, Paris, 1994, vol.II, p. 371-386.

Description claire et détaillée du programme Mosaïc.

ADRIEN, Jean-Marie et Joseph MORRISON, « MOSAIC : a framework for modal synthesis », *Computer Music Journal vol.17 n°1*, 1993, p. 45-56.

Description détaillée du programme Mosaïc, accompagnée d'exemples concrets de programmes.

ALESSANDRO, C. (d') - BEAUTEMPS, D., « Représentation, modification et synthèse du signal vocal par formes d'ondes élémentaires » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol.I p. 247-271.

Description de différentes techniques de modélisation de la voix, dont une par modélisation physique.

BARRIERE, Jean-Baptiste, « Les modèles de résonance : modèles de continuité entre synthèse et traitement. Une approche complémentaire des modèles physiques » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol.III, p. 731-755.

Description de la technique de synthèse par modèles de résonance, parallèle avec les modèles physiques. Discussion intéressante sur le problème de l'analyse-resynthèse.

BATTIER, Marc, « Entre l'idée et l'œuvre, parcours de l'informatique musicale » dans *Esthétique des arts médiatiques*, Sainte-Foy (Québec), Presse de l'université du Québec, collection esthétique, tome I, p. 319-335.

Description historique générale de la musique assistée par ordinateur.

BENADE, Arthur, « The physic of wood winds », 1990, réédité dans C.M.Hutchins, *The physic of music*, San Francisco, Freemann, 1978, p. 34-43.

Traité général d'acoustique. Permet de prendre connaissance des travaux de Benade concernant les bois.

BENADE, Arthur, *Fundamentals of Musical Acoustics*, New York, Oxford University Press, 1976, 600 p. réédité chez Dover Publications avec extensions et corrections, 1990.

Traité général d'acoustique. Il n'y est pas question de modèles physiques, cependant l'ouvrage apporte les nécessaires informations de base sur l'acoustique.

BONNET, Marie Dominique, *Cordes frottées et informatique*, mémoire de DEA, Paris, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Ircam, 1993, p. 180.

Propose une présentation simple et claire de toutes les techniques de modélisation physique.

CADOZ, Claude, « Instrumental gesture and musical composition », dans *Proceedings of the International Computer Music Conference*, San Francisco, International Computer Music Association, 1988, p. 1-12.

Etude de l'influence du contrôle gestuel sur la composition musicale.

CADOZ, Claude, « Modèle physique, création musicale et ordinateur » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, Paris, 1994, vol.I, p. 6-11.

Remarques générales sur ce qu'est le modèle physique et sur ses enjeux.

CADOZ, Claude, « Simuler pour connaître / Connaître pour simuler. Réflexions sur la représentation, la modélisation, la simulation et la création avec l'ordinateur » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol.III, p. 661-708.

Réflexion sur les thèmes de la représentation, de ses processus et de ses conditions. Un parallèle est fait entre l'utilisation du modèle par le scientifique et le musicien.

CADOZ, Claude, *Synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires, application aux sons musicaux*, mémoire de thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1979, p. 105.

Description du système Cordis-Anima et des transducteurs gestuels rétroactifs associés. Une étude logicielle très fouillée de Cordis intéressera ceux qui désirent approfondir le sujet.

CADOZ, Claude et Eric INCERTI, « Topology, geometry, matter of vibrating structures simulated with CORDIS-ANIMA, sound synthesis methods » dans *Proceedings of the International Computer Music Conference*, San Francisco, International Computer Music Association, 1995, p. 96-103

Description des techniques d'assemblage des atomes élémentaire de Cordis pour former des structures complètes.

CADOZ, Claude, Jean Loup FLORENS et Leszek LISOWSKI, « Modular Feedback Keyboard », dans *Proceedings of the International Computer Music Conference*, San Francisco, International Computer Music Association, 1990, p. 379-382.

Description du clavier rétroactif servant de contrôleur pour des modèles créés avec Cordis-Anima.

CADOZ, Claude, Jean Loup FLORENS et Annie LUCIANI, « Responsive Input Devices and Sound Synthesis by Simulation of Instrumental Mechanisms : the CORDIS System », *Computer Music Journal* v.8 n°3, 1984, p. 60-73, réédité dans C.Roads, *The music Machine*, Cambridge, Massachusett, MIT press, 1994.

Description détaillée et simple des simulations réalisées avec Cordis-Anima et des transducteurs gestuels dédiés à leur contrôle.

CADOZ, Claude, Jean Loup FLORENS et Annie LUCIANI, « CORDIS-ANIMA : système de modélisation et de simulation d'instruments et d'objets physiques pour la création musicale et l'image animée » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol II, p. 583-628.

Description très détaillée et parfois technique de Cordis-Anima et de son formalisme.

CADOZ, Claude et Nicolas SZILAS, « Physical Models that learn », dans *Proceedings of the International Computer Music Conference*, San Francisco, International Computer Music Association, 1993, p. 72-75.

Description d'une méthode d'analyse qui pourrait permettre de déduire d'un son la structure physique qui l'a produit.

CAUSSE, René, « Non-linéarités et phénomènes non-linéaires dans les instruments à cordes » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol.I, p. 219-230.

Remarques intéressantes sur l'utilité d'une synthèse imitative et sur l'intérêt musical d'une généralisation des phénomènes non-linéaires.

CAUSSE, René, Gerhard ECKEL et Francisco IOVINO, « Sound synthesis by physical modeling with Modalys » dans *Proceedings of the International Symposium of Music Acoustics*, Paris, société française d'acoustique, 1995, p. 478-482.

Description de Modalys et de ses fonctionnalités.

CHABADE, Joël, *Electric sound : The Past and Promise of Electronic Music*, State University of New York, Albany, ed. Prentice Hall, 1996, 370 p.

Ouvrage général retraçant toute l'histoire de la musique électrique, électroacoustique et informatique. Source de première main regroupant les opinions et témoignages de nombreux compositeurs.

COHEN-LEVINAS, Danielle, « Entretien avec Kaija Saariaho », *la synthèse sonore, cahier de l'Ircam n°2*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, 1^{er} trimestre 1993, p. 13-41.

Kaija Saariaho expose ici ses choix esthétiques et l'usage qu'elle fait de la synthèse sonore. Des remarques très intéressantes sont formulées à propos de la synthèse par modèles physiques.

COOK, Perry, « A Meta-Wind-Instrument Physical Model, and a Meta-Controller for real time performance control », dans *Proceedings of the International Computer Music Conference*, San Francisco, International Computer Music Association, 1992, p. 273-276.

Description détaillée du modèle général permettant de synthétiser n'importe quel instrument à vent par guides d'ondes et du contrôleur HIRN correspondant, créé par Cook.

COOK, Perry, Suzanne HIRSCHMAN et Julius Orion SMITH, « Digital waveguide modeling of reed woodwinds : an interactive development » dans *Proceedings of the International Computer Music Conference*, San Francisco, International Computer Music Association, 1991, p. 300-303.

Court exposé d'une simulation d'instrument à anche simple par la technique des guides d'ondes.

DEPALLE, Philippe, Xavier RODET, Denis MATIGNON et P. POUILLEUTE, « Premiers résultats sur les variables d'état et leur identification » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol II p. 317-350.

Description très technique des modèles en variables d'état. Quelques comparaisons intéressantes entre variables d'état, modèles physiques et modèles de signaux sont formulées.

DEPALLE, Philippe, Stéphan TASSART et Marcelo WANDERLEY, « Instruments virtuels », *Résonance n°12*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, 1997, p. 5-8.

Remarques générales sur les instruments servant de contrôleurs pour diverses synthèses, pour le déclenchement de sons pendant des concerts, ou reliés à des dispositifs de transformation.

FLORENS, Jean Loup, « Autour de la simulation instrumentale modulaire et du contrôle gestuel : Quelques problèmes théoriques et d'implantation » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol II p. 401-440.

Discussion des problèmes survenant lors du contrôle gestuel d'un modèle réalisé avec Cordis-Anima, en particulier du lien entre réel et virtuel.

HUOPANIEMI, Jyri, Tommi HUSTILAINEN, Matti KARJALAINEN et Vesa VALIMAKI, « Virtual instruments in virtual rooms- a real time binaural room simulation environment for physical models of musical instruments » dans *International Computer Music Conference*, San Francisco, International Computer Music Association, 1994, p. 455-462.

Description d'une simulation de cordes pincées et de bois, associée à la modélisation du rayonnement des instruments et de l'acoustique de la salle, ceci dans le but d'une diffusion par casque stéréo.

JAFFE, David et Julius Orion SMITH, « Extensions of the Karplus-Strong plucked-string algorithm », *Computer Music Journal vol.7 n°2*, 1983, p. 56-69.

Explication extrêmement technique des améliorations apportées par Jaffe à l'algorithme de Karplus et Strong.

KARJALAINEN, Matti, Vesa VALIMAKI et Tero TOLONEN,

« Plucked-string models : from the Karplus-Strong Algorithm to digital waveguides and beyond », *Computer Music Journal* v.22 n°3, 1998, p. 17-31.

Document assez technique et très détaillé expliquant l'évolution réalisée depuis la généralisation de l'algorithme de Karplus / Strong, jusqu'à la création de la synthèse par guides d'ondes.

KARPLUS, Kevin et Alex STRONG, « Digital synthesis of plucked string

and drum timbres », *Computer Music Journal* vol.7 n°2, 1983, p.43-55, article paru également dans Curtis Roads, *L'audio numérique*, traduit et adapté de l'anglais par Jean de Reydellet, Dunod, Paris, 1999, 679 p.

Document assez technique et très détaillé sur l'algorithme développé par Karplus et Strong pour la synthèse des cordes pincées, et sa généralisation à d'autres instruments.

LALIBERTE, Martin, « Informatique musicale : utopies et réalités »,

Utopies, Cahier de l'Ircam n°4, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, 4^{ème} trimestre 1993, p. 163-172.

Remarques sur utilisation de l'informatique dans la création musicale.

LOIZILLON, Guillaume, *Modes de description des sons et synthèse sonore*,

thèse de doctorat sous la direction d'Eveline Andréani, Université de Paris VIII, 1995-96, 312 p.

Un chapitre consacré à la modélisation physique (p251-275) décrit Modalys et propose des exemples de programmes de modèles. Loizillon développe l'idée intéressante d'une opposition entre objet sonore (Schaeffer) et événement sonore (modèle physique).

Modèles physiques pour la synthèse sonore, « table ronde du 20 septembre

1990 » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol II p. 629-643.

Discussion autour du problème du contrôle gestuel ou compositionnel du modèle.

NICOLAS, François, « Comment peut-on envisager de composer avec

Mosaïc ? in *Dans la distance : Cahier d'exploitation*, Marc Battier ed., Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, 1994, p. 39-46.

Nicolas présente l'opinion qu'il a de Mosaïc, discute des problèmes de composition, d'écriture et décrit les possibilités d'hybridation des modèles en expliquant l'intérêt qu'il leur porte.

NICOLAS, François, « La synthèse sonore déplace-t-elle l'acte de composition ? », in *Dans la distance : Cahier d'exploitation*, Marc Battier ed., Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, 1994, p. 66-78.

Discussion générale des problèmes d'utilisation des sons de synthèse dans les œuvres mixtes, et d'esthétique. Nicolas explique son opinion dans ces domaines et insiste sur l'idée d'un indispensable « corps à corps » entre musicien et instrument.

Physique des instruments, « table ronde du 19 septembre 1990 » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol I p. 305-315.

Discussion autour de la nature du modèle : qu'est-il, comment définir ses paramètres, à quoi sert-il ?

Représentation, simulation, création, « table ronde du 21 septembre 1990 » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol III p. 757-771.

Discussion autour du thème de la création du modèle et de son utilisation, du rapport entre scientifique et musicien. Une remarque de H.Vinet met en avant le rôle du geste instinctif et de son potentiel créatif.

RISSET, Jean-Claude, « Modèles physiques et perception - modèles physiques et composition » dans *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Paris, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, 1994, vol.III, p. 709-720.

Discussion de la relation entre psychoacoustique et modèles physiques. Risset avance l'idée que l'oreille se base sur la reconnaissance d'une origine physique du son.

ROADS, Curtis, « Initiation à la Synthèse par Modèles Physiques », *La synthèse sonore, Cahier de l'IRCAM n°2*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, 1^{er} trimestre 1993, p. 145-172, extrait de C. Roads, *Computer Music Tutorial*, Cambridge, Massachusett, MIT Press, 1994, p. 263-296.

Une traduction en français est désormais disponible : Roads, Curtis, *L'audionumérique*, traduit et adapté de l'anglais par Jean de Reydellet, Dunod, Paris, 1999, 679 p.

Ouvrage général. Présentation exhaustive de toutes les techniques de modélisation physique. Explications claires et détaillées sans excès.

RODET, Xavier - DEPALLE, Philippe - FLEURY, G. - LAZARUS, F., « Modèles de signaux et modèles physiques d'instruments : études et comparaisons », *Actes du colloque « Modèle physique, création musicale et ordinateur » organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, édition Maison des Sciences de l'Homme, collection Recherche, musique et Danse, Paris, 1994, vol II p.351-370.

Etude comparative des synthèses visant à reproduire le son lui-même et des synthèses modélisant la source du son. Sont exposés les avantages et inconvénients de la synthèse physique par rapport aux modèles de signaux

SAARIAHO, Kaija, « Notes du programme de la création » dans *Amers, cahier d'exploitation*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, 1992, p. 31-32.

Présentation de l'œuvre et renseignements nécessaires à son exécution.

SMITH, Julius Orion, « Observations sur l'histoire de la synthèse numérique du son » dans *la synthèse sonore, Cahier de l'Ircam n°2*, Paris, édition Ircam, centre George Pompidou, collection recherche et musique, 1^{er} trimestre 1996, p.83-95.

Remarques générales sur la synthèse numérique du son et sur son histoire.

DOCUMENTS ELECTRONIQUES

▪ Description des synthétiseurs :

Dennis Nomer, « VL1 overview », 1998 : <http://web800.com/music/vl/VL.HTM>

Description détaillée du VL1 et de ses qualités.

Patchman Music pro music products, « Yamaha VL1, VL1-m », 2000 :

<http://members.aol.com/Patchman1/yamahaVL1.html>

Informations sur les synthétiseurs VL1 et VL1-m de Yamaha

Dennis Nomer, « Yamaha VL1m audio », 1998 :

<http://www.sky.net/~kennyb/vl1m/audio/index.html>

Sons du synthétiseur VL1 au format « .au ».

Dennis Nomer, Yamaha, « VL Packages & Version 2 Upgrade » :

<http://www.web800.com/music/vl/vl1packs.htm>

Informations sur le VL1, le VL1m, le VL7 et le VL70m.

Yamaha, « VL7-m » :

<http://www.yamahasynth.com/pro/vl70m/intr1.html>

Informations sur le VL7-m de Yamaha.

Yamaha, « EX5, EX Series Music Synthesizer » :

<http://www.yamaha.com/cgi-win/webcgi.exe/DsplyModel/?gSYS00005EX5>

Informations sur le EX5 de Yamaha.

Yamaha, « Yamaha, EX5 » :

<http://www.synth.yamaha.de/EX5.HTM>

Informations sur le EX5 de Yamaha.

Yamaha, « Yamaha, EX5R » :

<http://www.synth.yamaha.de/EX5R.HTM>

Informations sur le EX5R de Yamaha.

Yamaha, « EX5, EX7 et EX5R » :

<http://www.yamahasynth.com/pro/ex5/intr1.html>

Information sur la série des synthétiseurs EX- de Yamaha.

Yamaha, « EX7, EX Series Music Synthesizer » :

<http://www.yamaha.com/cgi-win/webcgi.exe/DsplyModel/?gSYS00005EX7>

Informations sur le EX7 de Yamaha.

Yamaha, « WX5 wind MIDI controler » :

<http://www.yamahasynth.com/pro/wx5/intr1.html>

Information sur le contrôleur de souffle WX5 de Yamaha.

Ken Barry, « Yamaha WX7 MIDI Wind Controller » :

<http://www.sky.net/~kennyb/wx7/>

Informations sur le contrôleur WX7 de Yamaha.

Site commercial de Korg :

<http://www.korg.com/>

Permet d'obtenir des informations sur les synthétiseurs Oasys, Trinity et autres. Les pages changent souvent de nom, il est donc conseillé de partir du sommaire du site pour trouver les informations.

Harmony Central, « OASYS® (Open Architecture Synthesis System) », 1996 :

<http://www.harmony-central.com/Newp/WNAMM96/Korg/oasys.html>

Description du synthétiseur Oasys de Korg.

Harmony Central, « Korg Announces Oasys PCI Computer Card », 1999 :

<http://www.harmony-central.com/Newp/SNAMM99/Korg/Oasys-PCI.html>

Informations sur la carte « Oasys PCI ».

« www.vanille.de, information : the Oasys concept », 1999 :

<http://www.vanille.de/oasys.htm>

Information sur le synthétiseur Oasys et ses descendants Prophecy, Trinity et Z1.

Dennis Nomer, « Korg Prophecy », 1998 : <http://web800.com/music/vl/prophecy.htm>

Description du Prophecy de Korg.

Ken Barry, « Le Prophecy Korg, Prophecy solo synthesizer », 1999 :

<http://www.imagnet.fr/Keyboards/prophecy.htm>

Informations sur le synthétiseur Prophecy de Korg.

Harmony central, « Korg Z1 Synthesizer », 1997 :

<http://www.harmony-central.com/Newp/SNAMM97/Korg/Z1.html>

Informations sur le Z1 de Korg.

Planet-Groove, « Korg Z1, Korg Z1 Specifications », 1998 :

<http://www.planet-groove.com/korg/z1.html>

Fiche signalétique du Z1 de Korg.

Harmony Central, « Korg Launches Trinity V3 Music Workstation DRS », 1998 :

<http://www.harmony-central.com/Newp/SNAMM98/Korg/Trinity-V3.html>

Informations sur le Trinity-V3 de Korg.

Scott Wilkinson, « E-musician, article, archives, Electronic Musician, Technics SX-WSA1 »,

1996 : <http://www.e-musician.com/archive/9603/9603tech.html>

Critique du SX-WSA1 de Technics.

Technics France, « sx-WSA1 », 1997 :

<http://www.technics.com/SX-WSA1/SXWSA1.HTM>

Informations sur le synthétiseur SX-WSA1 de Technics.

Dennis Nomer, « Korg Wave Drum », 1998 : <http://web800.com/music/v1/wavedrum.htm>

Informations sur le Wave Drum de Korg.

Dennis Nomer, « Roland VG-8 », 1998 : <http://web800.com/music/v1/vg-8.htm>

Informations sur le VG8 de Roland.

Site commercial de Roland en Allemagne, « Roland VG-8 EX Virtual Guitar System » :

<http://www.musical-sounds.de/gitarre/roland/vg8.html>

Informations sur le VG-8 de Roland et le micro GK-2 associé.

Site commercial de Roland, « MI:Guitar products » :

http://www.rolandus.com/PRODUCTS/MI/MI_GP.HTM

Informations en bas de page sur le VG-8 de Roland et le micro GK-2 associé. Vidéos de démonstration par Jeff Baxter.

Site commercial de Roland, « VG-8ex V-Guitar System » :

<http://www.rolandus.com/PRODUCTS/INFO/HTML/VG8EXFX.HTM>

Informations techniques sur le VG-8ex de Roland.

▪ **Autres documents :**

Dill, Stephen, Karplus-Strong Algorithm, 1998 :

<http://www-ccrma.stanford.edu/~sdill/220A-project/drums.html#ks>

Etude des sons de percussions, synthétisés en particulier par le modèle de Karplus et Strong.

Hind, Nicky, « Physical Modelling Synthesis » :

<http://ccrma-www.stanford.edu/CCRMA/Software/clm/compmus/clm-tutorials/pm.html>

Description de l'algorithme de Karplus et Strong ainsi que d'un modèle de flûte de Perry Cook. Explications techniques simples avec exemples de programmes.

Ircam, Centre Georges Pompidou, « Acoustique instrumentale », 1999 :

<http://www.ircam.fr/departements/recherche/acou-ins.html>

Description des recherches en cours sur la modélisation physique des instruments et de la voix, et, l'étude du rayonnement des sources et l'amélioration des systèmes de diffusion.

Ircam, Centre Georges Pompidou, « Recherche et développement », 1999 :

<http://www.ircam.fr/departements/recherche/page1.html>

Présentation du département recherche de l'Ircam et des projets en cours de réalisation.

Ircam, Centre Georges Pompidou, Stephanie Dubois, « modalys-ER », 1999 :

<http://www.ircam.fr/produits/logiciels/log-forum/modalys.html>

Fiche descriptive du programme Modalys et de son interface graphique Modaliser.

Ircam, Centre Georges Pompidou, Veronique Verdier, « Acoustique des salles », 1999 :

<http://www.ircam.fr/departements/recherche/acou-salle.html>

Description du Spatialisateur utilisé pour la mise en espace des sons.

Ircam, Centre Georges Pompidou, Veronique Verdier, « Analyse-Synthèse », 1999 :

<http://www.ircam.fr/departements/recherche/ana-syn.html>

Description des recherches effectuées dans le domaine de l'analyse-resynthèse en ce qui concerne la synthèse par modèles physiques.

Jaffe, David, « Music and the Computer : Up-Ending the Family Tree, Keynote Address to the 1995 Conference of the Australian Computer Music Association », 1995 :

<http://ccrma-www.stanford.edu/~daj/acma.html>

Critique des différentes approches de la musique synthétisée par ordinateur.

Jaffe, David, Site personnel :

www.jaffe.com.

David Jaffe propose sur son site des articles récents, des extraits musicaux de ses œuvres, les notices des œuvres publiées ou non, les revues de presse et autres documents sur sa personne et son œuvre.

Lehman, Scott, « Physical Modeling Synthesis », 1996 :

http://www.harmony-central.com/Synth/Articles/Physical_Modeling

Discussion intéressante sur la synthèse par guides d'ondes et ses justifications. Explications simples et claires.

Dennis Nomer, « Physical modeling overview », 1998 :

<http://web800.com/music/vl/physmodl.htm>

Informations intéressantes sur l'application commerciale des modèles physiques. Autres pages intéressantes :

DISCOGRAPHIE

FERRETI, Ercolino, « Pipe and drums », *Historical CD of digital sound synthesis*, Computer music currents 13, Digital music digital, Wergo.

Ce double CD regroupe de nombreuses pièces d'intérêt historique et retrace l'histoire de la synthèse sonore.

LOIZILLON, Guillaume, « Fleurs et insectes », *Vanités*, Trace 004, 1997.

Ce disque regroupe des œuvres hétéroclites basées sur des poèmes, allant de la musique contemporaine au style rock.

JAFFE, David, « Silicon Valley Breakdown », *XXIst century mandolin acoustic and computer music by David A. Jaffe*, Well Tempered production, 1994.

Excellent enregistrement de quatre œuvres de David Jaffe.

JAFFE, David, *Telegram to the president*, The Jefferson string quartet, CDCM Computer music séries vol. 8, Centaur Label, CRC 2091.

INDEX

A

ACROE..... 16, 19, 33, 34, 46
 Adrien, Jean-Marie 16, 33, 49, 51, 137, 140

B

Beauchamp, James 15
 Benade, Arthur..... 22
 Berkeley (université)..... 19, 106
 Bernouilli, Joseph 26

C

Cadoz, Claude..... 16, 34, 105
 Caussé, René..... 16, 59
 CCRMA de Stanford..... 19, 61, 180, 183, 185
 Cook, Perry 70, 71, 74
 Cordis-Anima..... 16, 19, 33, 34
 Crawford, Frank..... 31

E

Eckel, Gerhard 16, 59

F

Ferreti, Ercolino 15
 Pipe and Drum..... 171, 173
 Florens, Jean-Loup..... 16, 34

H

Helmoltz, Hermann (von) 15
 Hertfordshire (université)..... 16, 19, 59, 60
 Hiller, Lejaren..... 15, 25, 29
 Hirschman, Suzanne..... 70

I

IRCAM..... 16, 19, 49, 50, 59, 60, 115, 137

J

Jaffe, David..... 61, 67
 Grass..... 166, 185
 May your children be acrobats 180
 Silicon Valley Breakdown..... 184
 Telegram to the president 172, 183

K

Karjalainen, Matti 75
 Karplus, Kevin..... 17, 61, 65, 68
 Kelly, John..... 15

L

Lauchbaum, Carol 15
 Laumann, Oliver 49
 Loizillon, Guillaume..... 111, 124, 157, 177
 Fleurs et Insectes 177
 L'ivresse est un nombre 177
 Lucianni, Annie 16

M

MacIntyre 22, 23, 24
 Mathews, Max 15
 Modalys 16, 19, 33, 59
 Modalyser 16, 50, 59, 159
 Modalys-ER..... 16, 59
 Modèle de Karplus/Strong. 17, 61, 62, 63, 68, 104
 Morrison, Joseph, Derek..... 16, 49
 Mosaïc 16, 33, 49

N

Nicolas, François 118, 124, 147, 176
 Dans la distance 147, 171, 176

P

paradigme à masses et ressorts 27
 Plass, Mickael..... 61

R

Rayleigh, John 15
 Risset, Jean-Claude..... 105, 113
 Roads, Curtis 19, 25
 Ruiz, Pierre..... 15, 25, 29

S

Saariaho, Kajia 33, 38, 114
 Amers..... 38
 Schumacher, Robert..... 22, 23, 24
 Smith, Julius Orion 17, 61, 67, 68
 Strong, Alex..... 17, 61, 62, 63, 68
 synthèse modale..... 31
 synthèse MSW 22
 synthèse par guides d'ondes 61

V

Van Duyne, Scott..... 72

W

Woodhouse 22, 23, 24

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS	5
INTRODUCTION	9
I. PRÉSENTATION ET HISTORIQUE DES MODELES PHYSIQUES EN MUSIQUE	11
1. <i>Description générale</i>	11
2. <i>Historique</i>	15
3. <i>Etat de l'art</i>	19
II. LES GRANDES TECHNIQUES DE MODÉLISATION	21
1. <i>Les démarches scientifiques et artistiques de modélisation</i>	21
1.1. Exemple de simulation numérique à des fins scientifiques : la technique de MacIntyre Schumacher et Woodhouse	22
1.1.1. <i>Principe théorique de la synthèse MSW</i>	23
1.1.2. <i>La modélisation MSW</i>	23
2. <i>Approche classique de la synthèse par modèles physiques : Les travaux de Hiller et Ruiz</i>	25
2.1. Equations différentielles	26
2.2. Paradigme à masses et ressorts	27
3. <i>La synthèse modale</i>	31
3.1. CORDIS-ANIMA	34
3.1.1. <i>Les modules physiques</i>	35
3.1.2. <i>Les modules fonctionnels</i>	38
3.1.3. <i>Les algorithmes élémentaires de CORDIS ANIMA</i>	39
3.1.4. <i>Les extensions</i>	43
3.1.5. <i>Contrôle des instruments simulés par des transducteurs gestuels rétroactifs</i>	44
3.2. Mosaïc.....	49
3.2.1. <i>Présentation</i>	49
3.2.2. <i>problèmes rencontrés</i>	50
3.2.3. <i>Le langage Mosaïc</i>	52
3.2.4. <i>Modalys / Modalys-ER</i>	59
4. <i>La synthèse par guides d'ondes</i>	61
4.1. Le modèle de Karplus / Strong	61
4.1.1. <i>Le principe des tables d'ondes</i>	62
4.1.2. <i>L'algorithme de Strong</i>	63
4.1.3. <i>L'apport de Karplus</i>	66
4.2. Extensions de Jaffe et Smith.....	68
4.3. La synthèse par guides d'ondes de Julius Orion Smith	69
4.4. Le méta-contrôleur HIRN de Perry Cook	74
5. <i>Les applications industrielles</i>	78
5.1. les synthétiseurs utilisant la synthèse par modèles physiques	79
5.1.1. <i>La série des synthétiseurs VL et VP de Yamaha</i>	80
5.1.2. <i>La série des synthétiseurs EX- de Yamaha</i>	83
5.1.3. <i>Les contrôleurs de souffle WX- de Yamaha</i>	85
5.1.4. <i>Le Korg Oasys</i>	87
5.1.5. <i>Le Korg Prophecy</i>	88
5.1.6. <i>Le Korg Z1</i>	90
5.1.7. <i>Le Korg Trinity</i>	91
5.1.8. <i>Le sx-WSA1 de Technics</i>	92

5.2. Modèles de synthétiseurs conçus pour une famille d'instruments en particulier : Le Wave Drum de Korg et le VG-8 de Roland.....	95
5.2.1. <i>Le Korg Wavedrum</i>	95
5.2.2. <i>Le Roland VG-8</i>	96
5.3. Conclusion	99
III. LA CRÉATION ARTISTIQUE AUTOUR DES MODÈLES PHYSIQUES	102
1. <i>Modèle de signal et modèle physique</i>	102
2. <i>La légitimité de la synthèse par modèles physiques</i>	106
3. <i>Objet sonore / Événement sonore</i>	112
4. <i>Un savoir instinctif ?</i>	114
5. <i>Analyse des sons pour extraire des modèles de synthèse physique</i>	116
6. <i>Savoir imiter pour mieux corrompre</i>	118
6.1. expérimentation, création d'un savoir	118
6.2. Imitation.....	119
6.3. Transgression et invention : le potentiel musical du modèle.....	120
7. <i>Le contrôle du modèle simulé</i>	128
8. <i>Espace, rayonnement et diffusion des sons synthétisés</i>	136
8.1. L'espace.....	136
8.2. Le rayonnement	137
8.3. La diffusion des sons synthétisés.....	140
9. <i>Laisser l'œuvre disparaître ou provoquer son obsolescence.</i>	141
CONCLUSION.....	144
ANNEXE 1 : ENTRETIENS AVEC LES COMPOSITEURS.....	148
1. <i>Entretien avec François Nicolas</i>	148
2. <i>Entretien avec Guillaume Loizillon</i>	158
3. <i>Courriers de David Jaffe</i>	166
ANNEXE 2 : EXEMPLES MUSICAUX	172
1. <i>Pipe and Drum de Ercolono Ferreti, 1963</i>	174
2. <i>Sons réalisés avec Modalys</i>	175
3. <i>Amers de Kaija Saariaho, 1992</i>	176
4. <i>Dans la distance de François Nicolas, 1994</i>	177
5. <i>Guillaume Loizillon</i>	178
5.1. <i>L'Ivresse est un nombre</i>	178
5.2. <i>Fleurs et Insectes</i>	178
6. <i>Sons provenant du synthétiseur VLI de Yamaha</i>	179
7. <i>Sons du synthétiseur VG8 de Roland</i>	180
8. <i>David Jaffe</i>	181
8.1. <i>May your children be acrobats (1981)</i>	181
8.2. <i>Telegram to the president (1984)</i>	184
8.3. <i>Sillicon Valley Breakdown (1982)</i>	185
8.4. <i>Grass (1988)</i>	186
BIBLIOGRAPHIE COMMENTÉE.....	188
DOCUMENTS ELECTRONIQUES	198
DISCOGRAPHIE	204
INDEX.....	206